



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁVRH LINEÁRNÍHO MOTORU

DESIGN OF SYNCHRONOUS LINEAR MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Jindra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Knebl

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Michal Jindra

ID: 195573

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Návrh lineárního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Literární rešerše na téma lineárních motorů.
2. Vytvořte model pro výpočet lineárního motoru vybranou metodou.
3. Zpracujte a zhodnoťte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.3. Skriptum, FEKT, VUT Brno
- [2] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech – Linear synchronous motors, CRC Press
- [3] Ion Boldea, S.A.Nasar - Linear motion electromagnetic devices, Taylor&Francis

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Knebl

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Předložená práce je zaměřena na synchronní lineární motor se železným jádrem, návrhem ekvivalentního magnetického obvodu a jeho výpočtem. Práce popisuje princip synchronního lineárního motoru s permanentními magnety, lineárního motoru bez železného jádra a tubulárního lineárního motoru. U těchto typů lineárních motorů je popsáno konstrukční řešení a jsou zmíněny obecné výhody a nevýhody. Dále jsou popsány ztráty tvořené v motorech. Práce přibližuje různé metody výpočtů motorů, které mohou být použity pro následnou aplikaci na určitý typ motoru. Následně je jedna z metod vybrána a použita na výpočet motoru. V poslední části je zhodnocení a porovnání výsledků.

Klíčová slova

Synchronní, lineární motor, permanentní magnety, feritové magnety, metoda konečných prvků, odporová síť, hysterezní ztráty, vířivé proudy

Abstract

Proposed thesis is focused on synchronous linear motor with an iron core, the design of an equivalent magnetic circuit and its calculation. The work describes the principle of a synchronous linear motor with permanent magnets, U-channel linear motor and a tubular linear motor. For these types of linear motors, the design solution is described and general advantages and disadvantages are mentioned. The losses generated in the motors are also described. The work introduces various methods of engine calculations that can be used for subsequent application to a particular type of motor. Subsequently, one of the methods is selected and used to calculate the motor. The last part is the evaluation and comparison of results.

Keywords

Synchronous, linear motor, permanent magnets, ferrite magnets, finite element method, resistive network, hysteresis losses, eddy currents

Bibliografická citace:

Jindra, M. *Návrh lineárního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2020. 41s. Vedoucí práce: Ing. Ladislav Knebl

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Návrh lineárního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **10.června 2020**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavu Kneblovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **10.června 2020**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Lineární motor	2
2.1	Úvod.....	2
2.2	Princip.....	2
2.3	Výhody a nevýhody lineárních motorů.....	3
2.4	Rozdělení.....	4
2.5	Příslušenství	4
2.5.1	Mechanické vedení	4
2.5.2	Lineární ložisko	5
2.5.3	Odměřovací systémy.....	5
2.5.4	Řídicí systémy	6
2.5.5	Senzorická soustava	6
3	Ztráty	7
3.1	Hysterezní ztráty	7
3.2	Hysterezní smyčka	7
3.3	Vířivé proudy.....	9
4	Magnety	11
4.1	Feritové magnety	11
4.2	Magnety ze vzácných zemin.....	11
4.3	Demagnetizace magnetů	12
5	Typy lineárních motorů	14
5.1	Lineární motor se železným jádrem	14
5.1.1	Primární díl	14
5.1.2	Sekundární díl	15
5.1.3	Nevýhody lineárního motoru se železným jádrem.....	15
5.1.4	Výhody lineárního motoru se železným jádrem.....	16
5.1.5	Použití.....	17
5.2	Lineární motor bez železného jádra	17
5.2.1	Primární díl	18
5.2.2	Sekundární díl	18
5.2.3	Nevýhody lineárního motoru bez železného jádra	18
5.2.4	Výhody lineárního motoru bez železného jádra.....	19
5.2.5	Použití.....	19
5.3	Tubulární lineární motor.....	19

5.3.1	Konstrukce tubulárního lineárního motoru	20
5.3.2	Nevýhody tubulárního lineárního motoru	20
5.3.3	Výhody tubulárního lineárního motoru	20
5.3.4	Použití.....	20
6	Metody výpočtu	22
6.1	Analytická metoda.....	22
6.2	Metoda konečných prvků	23
6.3	Metoda odporových sítí.....	24
7	Model odporové sítě lineárního motoru	28
7.1	Primární díl.....	29
7.2	Sekundární díl.....	30
7.3	Vzduchová mezera	31
7.4	Celkový model odporové sítě.....	32
7.5	Sestavení odporové sítě.....	33
7.6	Výpočet magnetické indukce	34
7.7	Výpočet posuvné síly	36
8	Porovnání výsledků	38
8.1	Porovnání výsledků odporové sítě s metodou konečných prvků.....	38
8.2	Porovnání vypočtené posuvné síly s katalogovým listem.....	39
9	Závěr.....	40

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 : Rozložení rotačního motoru do roviny [1].....	2
Obrázek 2-2 Šikmo lepené magnety na sekundární části, převzato z [28]	3
Obrázek 2-3 : Rozložení rotačního motoru do roviny 2 [4].....	3
Obrázek 2-4: Dělení lineárních motorů podle principu, modifikováno z [11]	4
Obrázek 2-5: Sestava lineárního motoru, modifikováno z [6].....	5
Obrázek 4-1 B-H charakteristika permanentních magnetů, převzato z [8].....	12
Obrázek 4-2 Demagnetizace magnetu, modifikováno z [13]	12
Obrázek 4-3 Demagnetizace magnetů v rotoru, modifikováno z [13]	13
Obrázek 5-1 Lineární motor se železným jádrem, modifikováno z [21]	14
Obrázek 5-2 Rozložení magnetů do tvaru V, modifikováno z [18]	15
Obrázek 5-3 Lineární motor bez železného jádra, modifikováno z [21]	17
Obrázek 5-4 Uspořádání magnetů u lineárního motoru bez železného jádra, modifikováno z [11].....	18
Obrázek 5-5 Tubulární lineární motor, modifikováno z [29].....	20
Obrázek 6-1 Zobrazení q-osy a d-osy u rotačního motoru, převzato z [32]	22
Obrázek 6-2 Síť vytvořená za pomoci metody konečných prvků	24
Obrázek 6-3 Analogie magnetického obvodu a elektrického obvodu, cívka, převzato z [15].....	26
Obrázek 6-4 Analogie magnetického obvodu a elektrického obvodu, cívka, převzato z [15].....	27
Obrázek 7-1 Ekvivalentní magnetický model lineárního motoru modifikováno z [12]	28
Obrázek 7-2 Okótovaný zjednodušený model lineárního motoru se železným jádrem modifikováno z [12].....	29
Obrázek 7-3 Ekvivalentní magnetický model primární části, modifikováno z [12].....	29
Obrázek 7-4 Ekvivalentní magnetický model sekundární části, modifikováno z [12].....	31
Obrázek 7-5 Ekvivalentní magnetický model vzduchové mezery, modifikováno z [12]	32
Obrázek 7-6 Celkový model odporové sítě zjednodušeného lineárního motoru, modifikováno z [12]	33
Obrázek 7-7 Upravený celkový model odporové sítě zjednodušeného lineárního motoru s vyznačenými smyčkami, modifikováno z [12]	34
Obrázek 7-8 Velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře	35
Obrázek 8-1 Velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře, porovnání MKP a odporové sítě	38

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 - Výhody a nevýhody lineárních motorů [3],[5].....	4
Tabulka 2 Výpočet magnetické indukce ve vzduchové mezeře	35
Tabulka 3 Parametry motoru LSE10G08	37

1 Úvod

Elektrické motory jsou jedny z nejpoužívanějších elektrických strojů, které jsou nejdůležitější částí elektrických pohonů. Prvním krokem pro úspěšné vyrobení motorů je jejich návrh. Pro návrh je možné použít několik metod. Jedná se o metodu konečných prvků, odporovou síť a analytickou metodu. Motory se neustále zdokonalují a zlepšují ve snaze snížení nákladů a tlaku na cenu, ale velkou roli hraje také tlak ze strany ekologie a legislativy. S objevováním nových materiálů a výrobních technologií je zde stále možnost, jak motory zlepšovat [1].

Speciálním druhem elektrických motorů jsou lineární motory, u kterých došlo k rozmachu až v posledních letech. Princip lineárních motorů je nám znám stejně dlouho jako u rotačních motorů. Lineární motory vynikají svojí bezporuchovostí, spolehlivostí, jednoduchou výrobou a návrhem. Jednou z jejich nevýhod je vyšší pořizovací cena, která je tvořena nejen samotným motorem, ale také potřebnými doplňujícími systémy jako jsou řídicí systémy a senzory, bez kterých není lineární motor schopen funkčnosti. K jejich rozšíření přispěl technický vývoj s myšlenkou automatizace, robotizace a průmysl 4.0. Dalším faktorem k rozvoji lineárních motorů je cenová dostupnost výkonové elektroniky a objevení vzácných zemin, které jsou používány v permanentních magnetech [1].

V této bakalářské práci je přiblížen princip funkce lineárních motorů. V dalších částech je popsán teoretický základ potřebný pro návrh, výpočty a parazitní jevy, které se u motorů objevují. Přiblíženy jsou i tři typy motorů, podle odlišného konstrukčního provedení.

Důležitou částí této bakalářské práce jsou teoretické základy pro vytvoření náhradního modelu stroje a využití metody odporových sítí pro výpočet magnetických toků a posuvné síly. Výsledek metody odporové sítě je porovnán s metodou konečných prvků získanou pomocí výpočtem modelu v programu Femag. Odporová síť byla vytvořena a simulována pomocí programu Matlab.

2 Lineární motor

Lineární motory využívají ve spoustě průmyslových odvětví a v dopravě. Lineární motory se vyznačují velkou přesností polohování, bezúdržbovým provozem, spolehlivostí a životností [1].

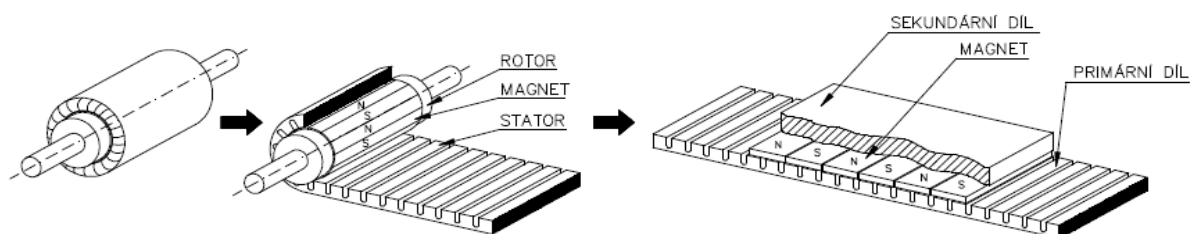
2.1 Úvod

Lineární motor je zařízení, které je schopno provádět lineární pohyb bez jakýchkoliv převodů. Tím odpadají nevýhody spojené s převody, jako je například opotřebování, s čímž je spojena postupně se snižující přesnost polohování [1].

Lineární synchronní motor je takový motor, ve kterém je mechanický pohyb synchronizován s magnetickým polem, tzn. rychlost mechanického pohybu je stejná jako rychlost magnetického pole. Využití lineárních pohonů se začalo rozšiřovat s vývojem nových technologií jako například objevení polovodičů využívaných ve výkonové řídicí elektronice, což zapříčinilo jejich nižší ceny. Jejich nespornou výhodou je rychlost posuvu, přesnost a polohovatelnost. Tyto vlastnosti jsou vyžadovány například u 3D tiskáren, CNC strojů a jiných průmyslových aplikací [1].

2.2 Princip

Vzhledem k zaměření bakalářské práce bude princip popsán na synchronním lineárním motoru s permanentními magnety. Lineární motor si můžeme jednoduše představit jako rotační motor, který je rozložený do roviny. To je pro představu možné vidět na Obrázek 2-1.



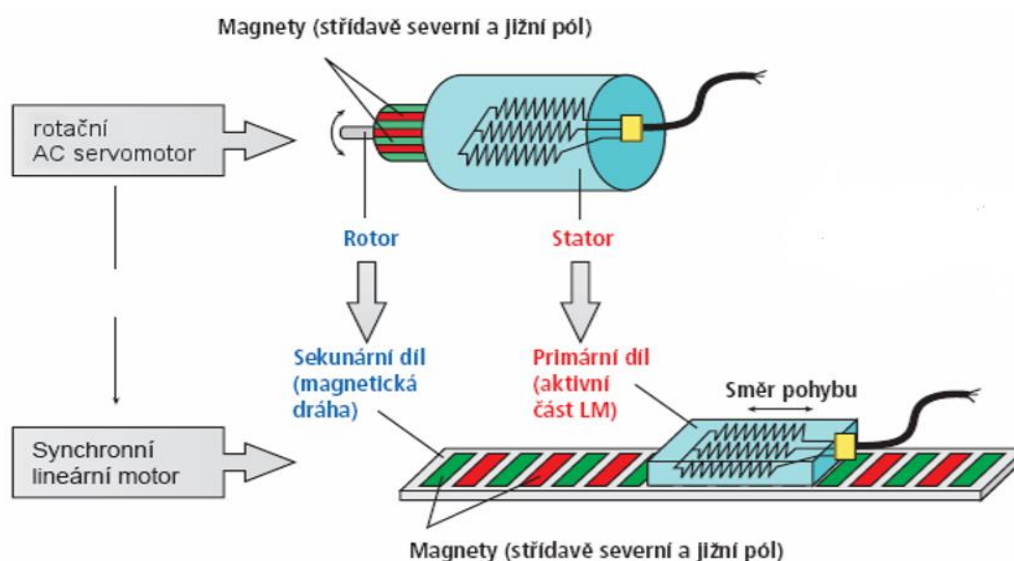
Obrázek 2-1 : Rozložení rotačního motoru do roviny [1]

Stejně jako u rotačních strojů mají i lineární stroje stator a rotor. Statorem je obvykle označován primární díl a rotorem sekundární díl. Primární díl, stejně jako stator, je tvořen svazkem elektrotechnických plechů s drážkami, ve kterých je vloženo trojfázové vinutí. Sekundární díl je tvořen ocelovou podložkou, na které jsou nalepené permanentní magnety. Ve většině případů se jedná o magnety ze vzácných zemin (NdFeB). V současné době s rostoucí cenou magnetů ze vzácných zemin je snaha využívat levnější feritové magnety [14]. Magnety jsou na podložku lepeny vedle sebe, střídavě severním a jižním pólem. Pro plynulejší pohyb motoru se používají dvě metody. Můžeme například zešíkmit drážky na primární části nebo lepit magnety šikmo na sekundární část, jak můžeme vidět na Obrázek 2-2.



Obrázek 2-2 Šikmo lepené magnety na sekundární části, převzato z [28]

Pokud bychom potřebovali dlouhou dráhu, kvůli spotřebované mědi v primárním díle by byl takto konstruovaný lineární motor značně drahý. Také by byl problém se spojováním primárních dílů a následným izolováním spojů. Proto se používá jiná konstrukce tohoto motoru, a funkce rotoru a statoru je opačná. Primární díl (stator) neboli jezdec se používá jako posuvná část a sekundární část (rotor) je část statická.



Obrázek 2-3 : Rozložení rotačního motoru do roviny 2 [4]

Tím získáme velkou výhodu v možnosti jednoduše prodloužit posuvnou plochu. Tímto zapojením však také vzniká jedna velká nevýhoda u primárního dílu a tou je nutnost pohyblivého přívodu napájení, snímačů polohy, případně i přívodu chladicí tekutiny. Na pohyblivý přívodní kabel jsou kladeny velké mechanické nároky. Například musí být dostatečně flexibilní, ale přitom musí vydržet velkou mechanickou zátěž, která na něj působí [2],[4].

2.3 Výhody a nevýhody lineárních motorů

V Tabulka 2-1 jsou shrnuty obecné výhody a nevýhody lineárních motorů. Mezi největší výhody patří absence mechanického převodu a jednoduchost výroby. Na druhé straně největší

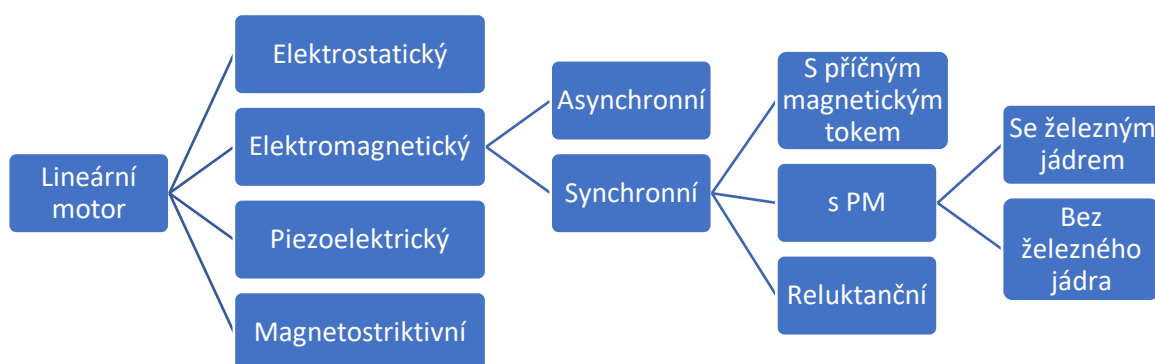
nevýhodou je potřeba řídicích systémů a senzorické soustavy, bez které není motor schopen provozu.

Tabulka 2-1 - Výhody a nevýhody lineárních motorů [3],[5]

Výhody	Nevýhody
Vysoká rychlost	Vysoká cena
Vysoká přesnost	Zahřívání, resp. chlazení
Rychlá odezva	Tření
Bez mechanické vůle	Pohyblivý přívodní kabel
Jsou bezúdržbové	
Spolehlivost a životnost	

2.4 Rozdělení

Lineární motory dělíme podle principů vzniku síly potřebné k lineárnímu pohybu viz Obrázek 2-4. Další rozdělení je podle typu konstrukce lineárního motoru.



Obrázek 2-4: Dělení lineárních motorů podle principu, modifikováno z [11]

2.5 Příslušenství

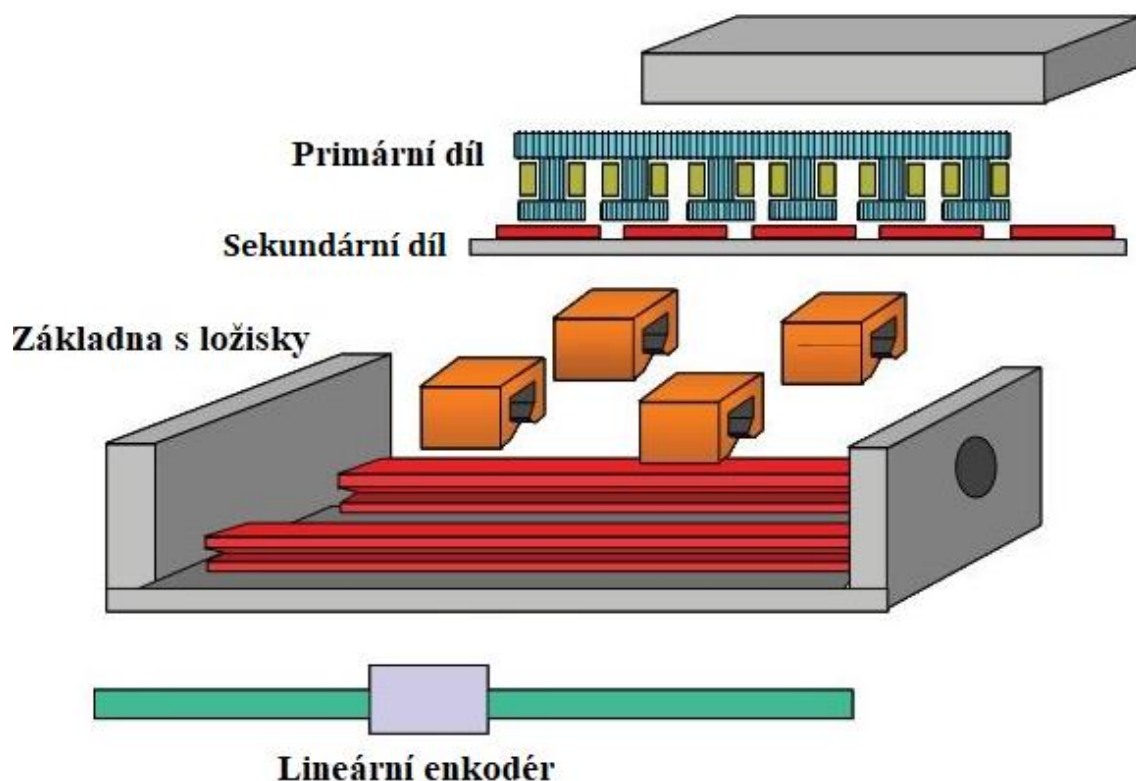
Lineární motor není schopen samostatného provozu bez příslušenství, které by zajistilo jeho bezporuchový provoz. Toto příslušenství obsahuje řadu senzorů a mechanických ochran.

2.5.1 Mechanické vedení

Tažná síla lineárního motoru je poměrně vysoká, a proto musí vedení vydržet velké dynamické síly. Kvůli požadované přesnosti musí být vedení odolné proti vibracím i nárazu. Špatná konstrukce mechanického vedení může způsobit úplnou ztrátu ovladatelnosti lineárního motoru. Důležitá je také konstrukce s ohledem na vibrace. Zvláště vibrace mezi 50 a 500 Hz mohou být škodlivé pro přesnost motoru. Dále platí pravidlo, že systém by měl být pevně spojen s masivním neohebným tělesem, které je alespoň 3krát těžší než akcelerující hmota jezdce se zátěží [7].

2.5.2 Lineární ložisko

Pro zajištění plynulého lineárního pohybu (posunutí) se používají robustní lineární ložiska, která se pohybují hladce po dvou kolejkách, jak je možno vidět na Obrázek 2-5.



Obrázek 2-5: Sestava lineárního motoru, modifikováno z [6]

Na lineární ložisko se kladou vysoké nároky. Ložiska jsou vybírána na základě vysokých rychlostí, akceleraace a životnosti. Jejich dalšími vlastnostmi jsou dlouhá životnost, vysoká přesnost, nízké náklady na údržbu, vysoká tuhost a nízká hlučnost. Důležitá je také tepelná roztažnost ložiska během provozu. Při dimenzování ložisek musíme brát v potaz také přitlačnou sílu.

V praxi se nejvíce používají kluzná ložiska, ložiska s valivým stykem a vzduchová ložiska [6].

2.5.3 Odměřovací systémy

Odměřovací systémy jsou důležitou součástí při řízení motoru. Bez systému odměřování by nebylo možné dosáhnout přesného polohování lineárního motoru. Tyto systémy jsou z velké části inkrementální. Pracují na reluktančním, magnetickém nebo optickém principu. Inkrementální snímače při lineárním pohybu generují pulsy, jejichž určitý počet odpovídá určité vzdálenosti posuvu. Závislost počtu pulsů na časovém úseku odpovídá rychlosti. Výstupní signál je tedy relativní a informuje jen o pohybu, ne však sám o sobě o přesné pozici. Nejčastěji jsou používány lineární enkodéry. Enkodéry jsou zařízení, která se obecně mohou použít v aplikacích, kde se měří délka, pozice, rychlost, úhel natočení nebo všechny veličiny, které na ně lze převést. Provádějí přeměnu mechanického pohybu na elektrické signály [27].

2.5.4 Řídící systémy

Bez vhodných řídicích systémů by lineární motor nebyl schopen provádět požadované úkony. Synchronní lineární motory s permanentními magnety se v dnešní době napájí a řídí pomocí elektronických měničů, přičemž součástí těchto měničů jsou i regulátory. Regulace se skládá ze tří zpětnovazebních smyček. Z proudové, polohové a rychlostní. Komunikace mezi motorem a regulátorem je obousměrná. Motor nepřijímá jen pasivně příkazy, ale aktivně posílá do regulátoru hodnoty popisující jeho aktuální stav, jako je například teplota, napětí a signalizace přetížení [1].

2.5.5 Senzorická soustava

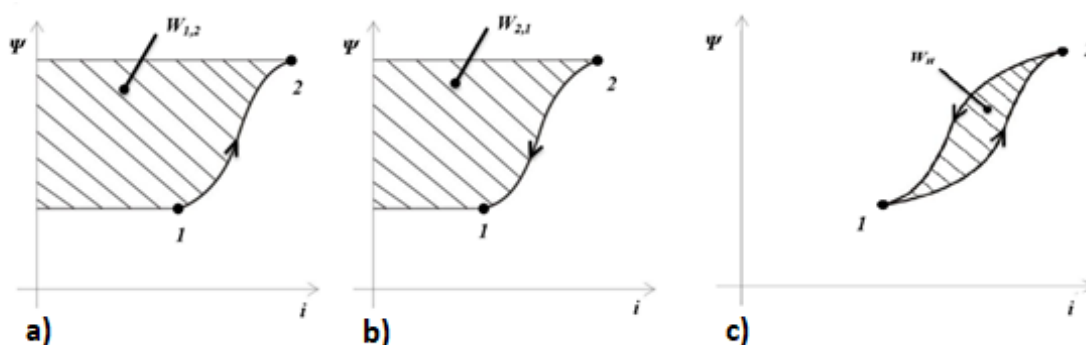
Motor je schopen odesílat hodnoty o svém stavu díky zabudovaným čidlům. Mezi ty patří například teplotní senzor a hallova sonda. Úkolem senzorické soustavy je zajistit správnou funkčnost a bezpečnost provozu. Sensory jsou elektronické součástky, které převádějí měřené veličiny na elektrický signál, jako je například napětí a proud. Ty jsou následně vyhodnocovány za pomoci řídicích systémů. Každý lineární motor obsahuje teplotní čidlo, které brání proti přehřátí motoru. Dalším důležitým prvkem je čidlo přítomnosti, které brání pojízdné části motoru v nárazu na mechanický doraz [27].

3 Ztráty

Ztráty se vyskytují v každém motoru, proto je důležité, aby byly při návrhu motoru brány v potaz. Ztráty v motoru jsou z velké části tvořené parazitním teplem. Jouleovy ztrátami, které vznikají ve vinutí průchodem proudu a ztráty v železe. Tyto ztráty způsobují ohřívání motoru. Konkrétně se jedná o hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy [9].

3.1 Hysterezní ztráty

Hysterezní ztráty v magnetických obvodech označujeme jako energii, která je přeměněna v tepelnou energii. Toto teplo vzniká oběhem pracovního bodu hysterezní smyčky pro daný materiál. Pracovní bod posunujeme z bodu 1 do bodu 2 po křivce. Při tomto posunu se do obvodu naakumuluje určité množství energie, zobrazeno na obrázku 3-1 a). Následně při pohybu z bodu 2 do bodu 1 obvod odevzdá energii do zdroje, viz obrázek 3-1 b). Odevzdaná energie je menší než dodaná. Rozdílem energií získáme celkové hysterezní ztráty, které jsou znázorněné na obrázku 3-1 c).



Obrázek 3.1 a) Energie naakumulovaná v magnetickém obvodu při přechodu z bodu 1 do bodu 2, b) z bodu 2 do bodu 1, c) celkové hysterezní ztráty modifikováno z [9]

Matematicky je tento rozdíl určen jako:

$$W_h = W_{h12} - W_{h21}$$

Ztrátový výkon je roven ploše hysterezní smyčky, jak můžeme vidět na Obrázek 3.1 c). Čím větší je plocha smyčky, tím větší práci musíme dodat, aby se feromagnetický materiál dostal do původního energetického stavu [9].

3.2 Hysterezní smyčka

Hysterezní smyčka je závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H ve feromagnetickém materiálu. Hysterezní smyčka je pro každý materiál jiná a můžeme z ní určit, o jaký materiál se jedná a jaké bude jeho možné využití v magnetických obvodech.

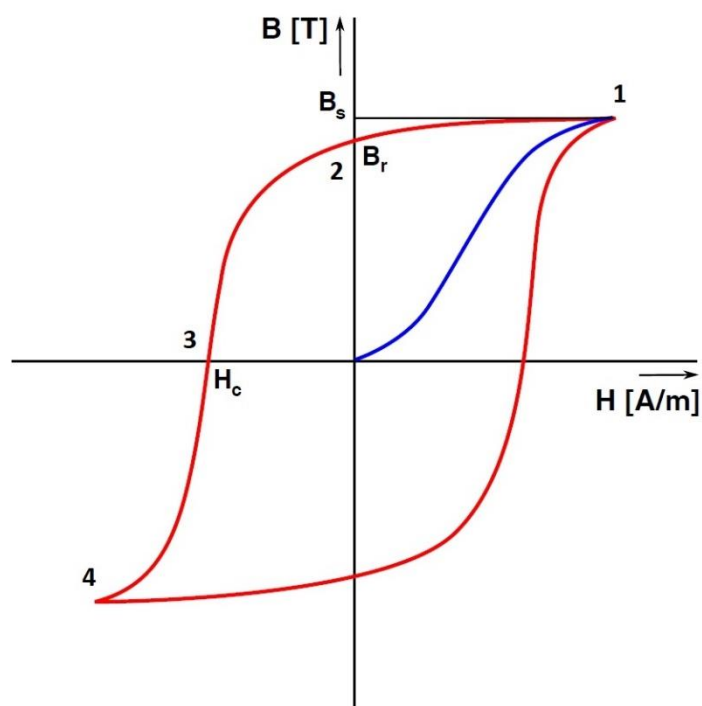
Vložíme-li do magnetického pole feromagnetický materiál, který je magnetován poprvé, začne se materiál magnetovat podle křivky prvotní magnetizace do tzv. bodu nasycení, který je označen jako bod (1) na obrázku 3-2.

Jakmile magnetické pole zanikne, látka zůstane částečně zmagnetovaná, což se projeví remanentní indukcí B_r , označeno jako bod (2) na obrázku 3-2. U magneticky měkké látky

zanikne zbytkový magnetizmus teprve vlivem tepelných pohybů látkových částic. U magneticky tvrdých látek nezaniká.

Začneme-li působit na materiál magnetickým polem s opačnou polaritou, demagnetizujeme ho a remanentní magnetizmus zaniká. K odstranění remanentního magnetizmu musíme vynaložit práci. Intenzita magnetického pole potřebná k odstranění remanentní indukce se nazývá koercivní intenzita H_c , označeno jako bod (3) na obrázku 3-2.

Pokud budeme pokračovat, magnetizací dosáhneme nového zmagnetování feromagnetické látky, ale magnetické póly budou opačné, zaznačeno jako bod (4) na obrázku 3-2 [10].



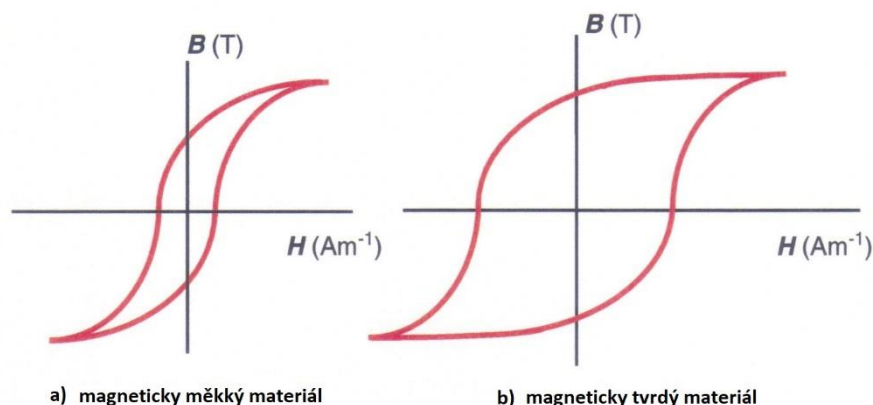
Obrázek 3-2 hysterezní smyčka modifikováno z [10]

Z hysterezní smyčky je patrné, že magnetizace pokračuje jen do bodu, který odpovídá nejvyšší dosažené magnetické indukci. Magnetizace feromagnetických látek neprobíhá rovnoměrně. Zpočátku se v magnetickém poli usměrní nejvíce domén, později se přírůstek usměrněných domén stále zmenšuje. Po usměrnění všech domén již nelze žádným způsobem zvětšit magnetickou indukci látky. Dochází k jejímu magnetickému nasycení B_{max} .

Po změně směru magnetického pole probíhá opět demagnetizace a tím se hysterezní smyčka uzavře [10].

Feromagnetické látky podle šířky hysterezní smyčky dělíme na:

- magneticky měkké viz Obrázek 3-3 a)
- magneticky tvrdé viz Obrázek 3-3 b)



Obrázek 3-3 křivka magneticky měkkého a magneticky tvrdého materiálu

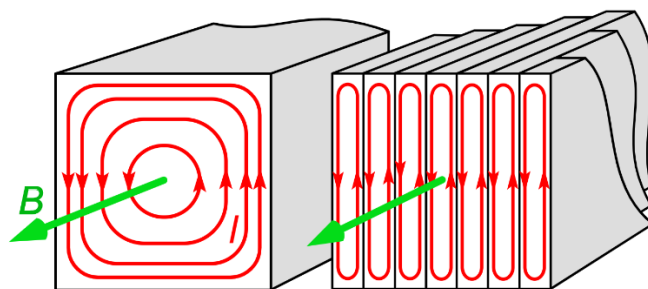
Magneticky měkké materiály díky jejich snadnému zmagetování a odmagetování využíváme jako plechy na transformátory nebo také jako statorové či rotorové plechy.

Magneticky tvrdé materiály se díky jejich schopnosti udržet si magnetické pole využívají jako permanentní magnety [9].

3.3 Vířivé proudy

Vířivé proudy jsou smyčky elektrického proudu indukovaného uvnitř vodičů změnou magnetického pole ve vodiči podle Faradayova zákona o indukci. Vířivé proudy proudí v uzavřených smyčkách uvnitř vodičů v rovinách kolmých na magnetické pole. Mohou být indukovány uvnitř blízkých stacionárních vodičů. Například časově proměnným magnetickým polem vytvořeným střídavým elektromagnetem, transformátorem nebo relativním pohybem mezi magnetem a blízkým vodičem. Velikost proudu v dané smyčce je úměrná síle magnetického pole, ploše smyčky, rychlosti změny toku a nepřímo úměrná odporu materiálu [9], [22].

Proud protékající odporem vodiče také rozptyluje energii jako teplo v materiálu. Proto jsou vířivé proudy příčinou energetické ztráty v induktorech střídavého proudu, jako jsou transformátory, elektrické motory a generátory. Pro snížení vířivých proudů se využívá metoda rozdělení magnetického jádra na tenké plechy, jak je znázorněno na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** [9], [22].



Obrázek 3-4 Vířivé proudy, převzato z [22]

Přestože jsou vířivé proudy považovány za negativní efekt, jsou určité oblasti, kde se tohoto jevu využívá. Vířivý proud vytváří magnetické pole, které působí proti změně magnetického pole, které jej vytvořilo, a tak vířivé proudy reagují zpět na zdroj magnetického pole. Například blízká vodivá plocha bude vyvíjet tažnou sílu na pohybující se magnet, který je proti jeho pohybu, v důsledku vířivých proudů indukovaných na povrchu pohyblivým magnetickým polem. Tento efekt se používá u brzd s vířivými proudy, které slouží k rychlému zastavení rotace elektrického nářadí při jeho vypnutí. Vířivé proudy se také používají k zahřívání předmětů v indukčních topných pecích a zařízeních ke zjišťování trhlin v kovových částech pomocí zkušebních přístrojů s vířivým proudem [22].

4 Magnety

Magnety jsou jednou z hlavních částí synchronních motorů s permanentními magnety. Správný výběr tvaru a typu magnetu je pro tyto motory zcela stěžejní, jelikož při nevhodně zvoleném magnetu může v motoru dojít k částečné nebo úplné demagnetizaci v důsledku vysoké hustoty magnetického toku ve vzduchové mezeře. Proto je při návrhu motoru důležité zvolit magnet tak, aby nedošlo k jeho demagnetizaci a byly vhodné pro zvolenou aplikaci [8].

Magnet je předmět, který je schopen vytvářet kolem sebe magnetické pole. Permanentní magnety jsou tvořeny magneticky tvrdými látkami. Feromagnetické látky jsou typické tím, že mají spontánní magnetismus a to i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole. Avšak bez působení vnějšího magnetického pole jsou domény směřovány náhodně a chaoticky, takže navenek vypadá látka jako nemagnetická. Poté, co dáme feromagnetickou látku do vnějšího magnetického pole, začnou se domény orientovat stejným směrem, které má vnější pole, až do bodu nasycení. Když dosáhneme bodu nasycení, znamená to, že jsou všechny domény nasměřovány stejným směrem jako je vnější magnetické pole. Typickou vlastností feromagnetických materiálů je, že si materiál uchovává magnetické vlastnosti, které získal během magnetování, i po té, co vnější magnetické pole zanikne. Pokud vystavíme magnet courierově teplotě, magnet začne ztrácet svoje magnetické vlastnosti [8].

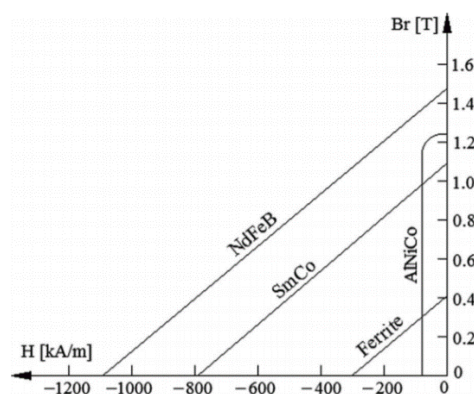
4.1 Feritové magnety

Feritové magnety jsou tvořeny oxidem železa a baria. Jsou nejpoužívanějším a nejrozšířenějším typem magnetu a to díky jejich nízké ceně. Feritové magnety jsou vyráběny z prášku jedolivých kovů spékáním. Magnety vyráběné touto metodou mají mechanické vlastnosti podobné keramice. Jsou tvrdé, ale zároveň křehké a dají se snadno rozbít. Feritové magnety jsou odolné vůči korozi a oxidaci. Také jsou odolné proti odmagnetování. Jejich pracovní teplota je v rozmezí -20°C až $+250^{\circ}\text{C}$ a tím pádem jsou možnou alternativou pro použití v elektrických strojích [8].

I když jsou ferritové magnety cenově atraktivnější než magnety ze vzácných zemin a ovlivní cenu konečného produktu, přesto se u lineárních motorů nesetkáme s velkým využitím.

4.2 Magnety ze vzácných zemin

Tyto magnety jsou tvořené slitinou ze vzácných kovů jako je například Neodym (Nd) nebo Samarium (Sm). K těmto prvkům se přidávají přechodové kovy jako je Železo (Fe), Cobalt (Co) nebo Bor (B). Ve srovnání s feritovými magnety mají magnety ze vzácných zemin mnohem vyšší magnetickou indukci a intenzitu magnetického pole, jak je vidět na Obrázek 4-1.

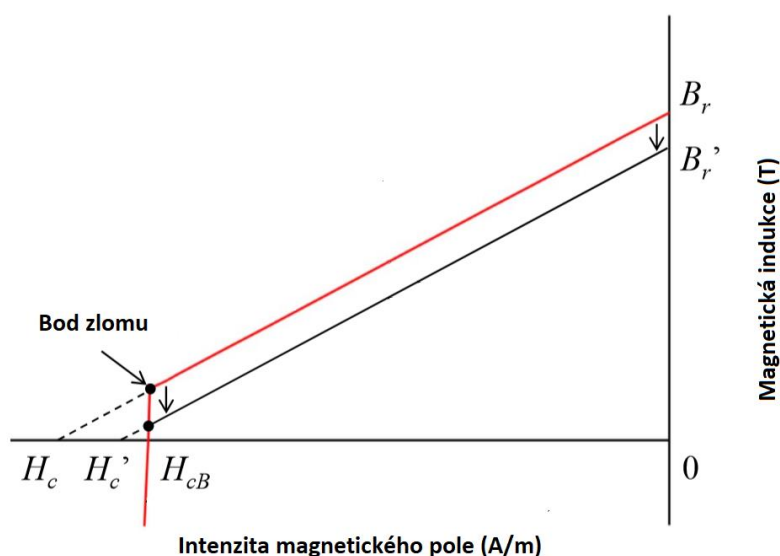


Obrázek 4-1 B-H charakteristika permanentních magnetů, převzato z [8]

Díky skvělým magnetickým vlastnostem se na trhu staly nejžádanějšími magnety neodymové. Jsou jedny z nejsilnějších magnetů, které jsou dostupné na komerčním trhu. Tyto magnety se hodí tam, kde potřebujeme velkou sílu, ale zároveň co možná nejmenší rozměr. I přes jejich dobré vlastnosti je kvůli jejich rostoucí ceně snaha používat levnější alternativy magnetů, jako jsou feritové magnety. Neodymové magnety jsou tvrdé a křehké. Jejich vlastnosti jsou velmi závislé na teplotě a jsou náchylné ke korozi [8].

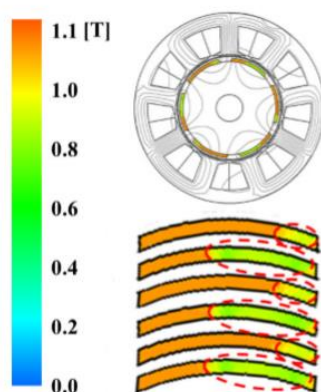
4.3 Demagnetizace magnetů

Magnety mohou degradovat nejen vlivem okolního magnetického pole, ale například také jejich teplotním přetěžováním. Například pokud překročíme jejich Curieovu teplotu, mohou se magnety částečně nebo úplně odmagnetovat. Magnety mají určitou pracovní charakteristiku viz Obrázek 4-2. Na té je patrné, že pokud magnet pracuje v pracovní části charakteristiky, tak se vrátí na původní hodnotu B_r . Pokud však překročíme bod zlomu, tak po proběhnutí demagnetizace se dostaneme na nižší hodnotu B_r' . Takto se může stát, že stálým přetěžováním se bude magnetická indukce snižovat, dokud magnet nebude zcela demagnetován. Se snižující se magnetickou indukcí se zhoršují vlastnosti stroje [13].



Obrázek 4-2 Demagnetizace magnetu, modifikováno z [13]

K demagnetizaci nedochází jen překročením curierovy teploty, ale může k ní dojít i při překročení maximální dovolené hodnoty proudu, reakcí kotvy a inverzní magnetické pole. Na Obrázek 4-3 je vidět demagnetizaci magnetů způsobenou překročením proudu. Jedná se o demagnetizaci nevratnou. Z obrázku 4-3 je patrné, že magnety jsou nejvíce náchylné k demagnetizaci na okraji ve směru otáčení rotoru.



Obrázek 4-3 Demagnetizace magnetů v rotoru, modifikováno z [13]

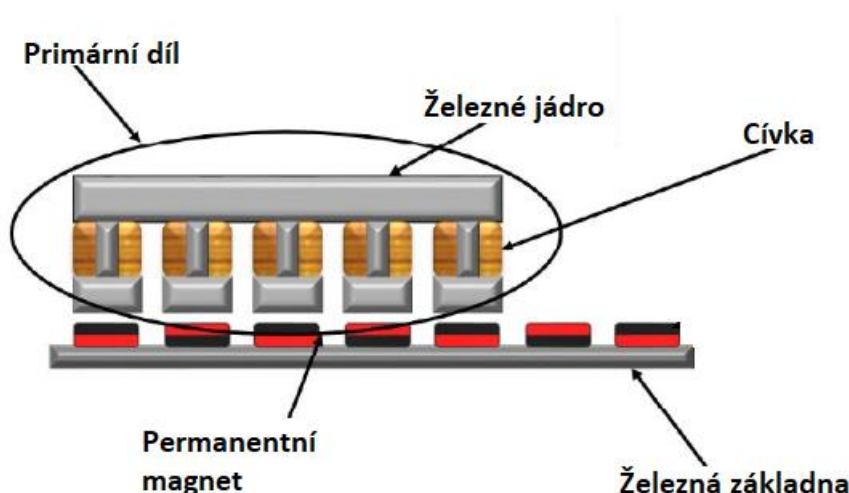
Částečná nebo úplná demagnetizace může mít fatální následky na funkci motoru. Pokud dojde k nevratné demagnetizaci, je výkon motoru extrémně snížen kvůli snížené zpětné elektromotorické síle a výstupnímu točivému momentu. Hlavními důvody nevratné demagnetizace jsou zvýšení teploty, reakce kotvy a inverzní magnetická pole. S vyšším proudem se začne postupně zvyšovat teplota motoru nad dovolenou teplotu. Vyšší teplota má negativní vliv na elektrickou izolaci cívek a může dojít k nevratným škodám na motoru při zničení izolace a následném zkratu [13].

5 Typy lineárních motorů

Dnes jsou na trhu tři hlavní systémy lineárního pohybu s přímým pohonem. Tyto tři typy motorů mají zřetelné výhody a nevýhody. Na základě aplikace bude jeden motor lépe vyhovovat než kterýkoli z ostatních motorů. Tyto tři motory jsou rozdílné konstrukčním zpracováním a jedná se o lineární motor se železným jádrem, lineární motor bez železného jádra a tubulární lineární motor.

5.1 Lineární motor se železným jádrem

Jedná se nejznámější typ lineárního motoru. Tento typ lineárního motoru využívá magnety ze vzácných zemin. Jak je možné vidět na Obrázek 5-1, motor má elektromagnetické cívky, které jsou vloženy do drážek železného jádra. Účinkem tohoto provedení je zvýšení množství magnetického pole generovaného cívkami, protože železo přispěje ke generovanému poli přesměrováním mikroskopických magnetických domén v železe tak, aby byly v souladu s magnetickým polem z cívek. Hlavní výhoda motoru se železným jádrem je v tom, že pro daný vstup proudu existuje značné množství síly, které může být generováno v důsledku tohoto chování [21],[30].



Obrázek 5-1 Lineární motor se železným jádrem, modifikováno z [21]

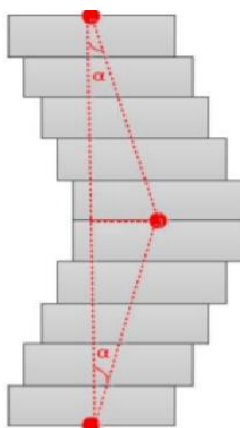
5.1.1 Primární díl

Primární díl je tvořen tenkými elektrotechnickými plechy kvůli potlačení vlivu vířivých proudů. Kvalita a tloušťka plechů, ale i technologie výroby těchto plechů velmi ovlivňují vlastnosti plechů, a tedy celého motoru. Konkrétně se jedná o mechanickou odolnost, magnetické a tepelné vlastnosti motoru. V drážkách motoru je vloženo trojfázové vinutí. Pro dosažení co možná nejnižších ztrát se používá čistá elektrotechnická měď. Vodiče jsou od plechů odděleny tzv. drážkovou izolací. Vodiče jsou lakovány a uspořádány do cívek, které vytvářejí průchodem elektrického proudu magnetické pole. Celý primární díl je zalitý v epoxidu, aby cívky byly mechanicky chráněné před poškozením. Epoxid také pomáhá v přenosu tepla a funguje jako dodatečná elektrická izolace.

Některé typy motorů potřebují vodní chlazení z důvodu vysokých proudů. Vodní chlazení je součástí statoru. Chladicí trubice jsou také zalité v epoxidu. Jelikož stator je pohyblivá část motoru, která obsahuje jak elektrické vinutí, tak chlazení, je nutné, aby k této části byl připojen pohyblivý přívodní kabel. Kabelem musí být přiváděno k motoru napájení a pokud motor obsahuje chlazení, tak i chladicí kapalinu. Na přívodní kabel jsou kladeny velké nároky, protože musí vydržet neustálé mechanické ohýbání [21].

5.1.2 Sekundární díl

Konstrukce sekundárního dílu je velmi jednoduchá. Jedná se o ocelovou desku, na kterou jsou nalepené permanentní magnety. Magnety se lepí pod určitým úhlem, viz Obrázek 5-2, aby se zlepšila plynulost pohybu primárního dílu motoru, tzv. snížení coggingu. Výhodou použití takto vyrobeného sekundárního dílu je možnost libovolně a jednoduše prodloužit délku dráhy prostým přidáním další desky. V posledních letech se snaží snížit zádržnou sílu (cogging) se začalo zkoušet a testovat nové rozložení magnetů do tvaru V na sekundárním dílu, jak můžeme vidět na Obrázek 5-2.



Obrázek 5-2 Rozložení magnetů do tvaru V, modifikováno z [18]

S takto uspořádanými magnety na sekundárním dílu lineárního motoru se dosáhne podstatně nižšího zvlnění tahové síly, aniž by se výrazně snížila průměrná tahová síla v porovnání s klasicky uspořádaným sekundárním dílem, nevýhodou je větší rozměr sekundárního dílu [21].

5.1.3 Nevýhody lineárního motoru se železným jádrem

Jako každý motor mají i lineární motory se železným jádrem řadu nevýhod, které je nutné brát v potaz. V následujících podkapitolách jsou přiblíženy ztráty a parazitní síly, které se objevují u tohoto typu motoru a konstrukční nedostatky.

5.1.3.1 Zádržná síla (cogging)

Jedná se o významný problém, pokud požadavky na systém zahrnují plynulost pohybu. Zádržná síla je pohyb statoru, který se přizpůsobuje magnetickým pólům permanentních magnetů, a to díky přitažlivým silám vytvářeným indukovanými magnetickými poli ve statoru permanentními magnety. Zádržná síla je přítomna ve všech motorech (rotačních nebo lineárních), které používají železné plechy pro stator a permanentní magnety [30].

5.1.3.2 Vířivé proudy a teplo

Použití časově proměnlivých magnetických polí, například u elektrického motoru, který má významný obsah feromagnetického materiálu, vytvoří vířivé proudy. To je důsledek vzájemného působení měnících se magnetických polí a feromagnetického materiálu. Tyto vířivé proudy mají na provoz motoru několik dopadů. Prvním je vytvoření protichůdného magnetického pole proti elektromagnetickému poli vytvořenému elektromagnetickými cívkami a druhým je tvorba tepla v železných komponentách v důsledku odporového zahřívání proudem v kovu. Ačkoli dnes vyráběné motory se železným jádrem podnikají kroky ke snížení produkce vířivých proudů, jako je například rozdělení jádra na tenké plechy, nelze je zcela vyloučit [21],[9].

5.1.3.3 Magnetická saturace

Zdroj generování velké síly u motoru se železným jádrem také představuje výzvu v činnosti, když tlačí generované síly mimo normální provozní rozsah. Důvod, proč motory se železným jádrem jsou schopny generovat tak velkou sílu, je ten, že železo v motoru má magnetické domény, které se přeorientují na magnetická pole vytvářená cívkami. To zvyšuje intenzitu magnetického pole a tím i generovanou sílu. Jak se pole z cívek zvětšuje, více domén se usměrňuje, dokud nejsou všechny usměrněné. V tomto okamžiku železo dosáhlo magnetického nasycení a poměr síly a proudu se změní a stává se nelineární, což ztěžuje jejich řízení [21].

5.1.3.4 Velikost magnetů

Základní konstrukce železných jádrových motorů vede k tomu, že motory mají poměrně velké magnety. Permanentní magnety, které se používají v motoru, jsou uspořádány tak, aby buď severní, nebo jižní pól směřoval k primárnímu dílu. To vyžaduje, aby byly magnety větší. Magnety bývají širší nebo delší než primární díl proto, aby se zvýšilo množství generované síly, protože při vytváření síly se využívá pouze polovina magnetického toku z motoru [21].

5.1.3.5 Boční a přitažlivé (parazitní) síly

Přitažlivá síla, která existuje mezi železným jádrem a permanentními magnety, může být výrazně větší než velikost síly, která je vytvářena při napájení motoru. Tato síla bude přitahovat primární díl směrem k magnetům a vyžaduje se, aby lineární vedení bylo robustnější než pro jiné lineární motory. Tato situace také vytváří boční síly, které by primární díl posunuly mimo trať, pokud by to bylo možné. To také vyžaduje, aby konstrukce mechanického vedení měla zavedena další omezení, aby odolávala těmto bočním silám [21].

5.1.3.6 Konstrukce

Konstrukční provedení bez uzavřených oblastí je náchylné ke kontaminaci. Působením magnetických sil v permanentních magnetech jsou přitahovány železné špony a prach, které mohou motor poškodit. Proto je při provozu tohoto typu motoru nutné dbát na čisté pracovní prostředí [21].

5.1.4 Výhody lineárního motoru se železným jádrem

Největší výhodou tohoto typu motoru je velká síla, kterou dokáže generovat. Díky velké síle je schopen hýbat s většími hmotnostmi než další dva typy motorů zmíněné v této práci. Další

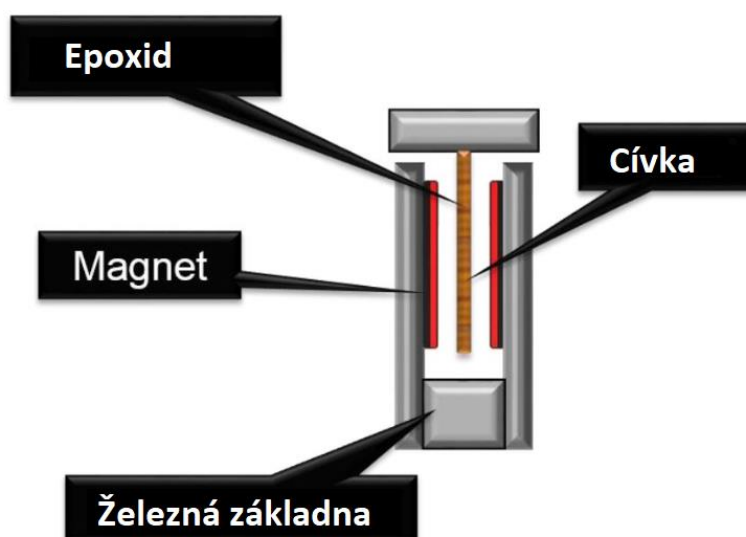
výhodou je možnost chlazení motoru. Oproti lineárnímu motoru bez železného jádra má tento typ motoru efektivnější metody chlazení. Železo má relativně dobrou tepelnou vodivost a navíc díky objemu jha je možné zavést přímo do jha trubky s chladícím médiem. Protože lineární motory se železným jádrem nemají uzavřený primární díl, jako je tomu například u motoru bez železného jádra, dokáží částečně odvádět teplo sáláním a konvekcí. Tato skutečnost umožňuje, že se tento typ motoru vyrábí i bez vodního chlazení a je schopen se uchládit sám vzduchem, což ušetří pořizovací náklady za čerpadlo a další nutnosti potřebné k vodnímu chlazení [21].

5.1.5 Použití

S vysokými trvalými silami a dobrým odvodem tepla jsou lineární motory se železným jádrem ideální pro lisování, formování a obrábění. Vynikají také při vysokorychlostním testování, které vyžaduje použití vysokých sil nebo tlaků [21].

5.2 Lineární motor bez železného jádra

Dalším typem lineárního motoru, který bude popsán, je lineární motor bez železného jádra. Stejně jako lineární motor se železným jádrem, i tento typ motoru používá permanentní magnety ze vzácných zemin, jako jsou magnety neodymové a samariové. Lineární motory bez železného jádra byly navrženy tak, aby měly přímý pohon lineárního motoru bez některého negativního chování motorů se železným jádrem. Jedním z hlavních rysů tohoto motoru je absence železného jádra z kritických míst. Tím se eliminuje ozubení a nelineární vztah mezi silou a proudem v důsledku magnetického nasycení. Aby se zvýšila velikost síly generované motorem, byla do motoru přidána další sada permanentních magnetů v oboustranné konfiguraci. Kromě toho je primární díl vyráběn s elektromagnetickými cívkami, které jsou epoxidově připevněny k neželeznému plechu, obvykle vyrobené z hliníku. Schéma lineárního motoru bez železného jádra je znázorněno níže na Obrázek 5-3 [11].



Obrázek 5-3 Lineární motor bez železného jádra, modifikováno z [21]

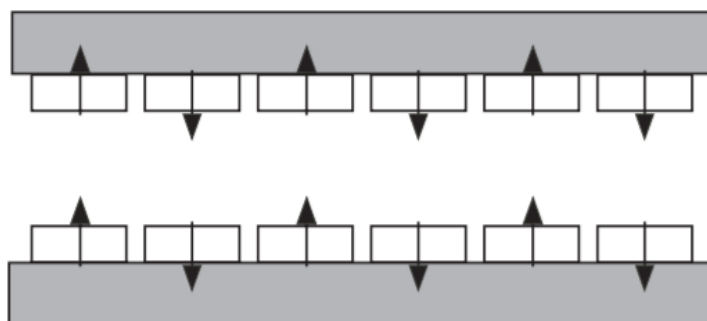
Konstrukce lineárního motoru bez železného jádra je specifická tím, že magnety na sekundárním dílu obklopují primární díl, a to z prostého důvodu, aby se zvýšila tahová síla [21].

5.2.1 Primární díl

Primární díl je tvořen vinutými elektromagnetickými cívkami, které jsou zalité v epoxidu, díky kterému jsou připevněny k neželeznému rámu, který je obvykle hliníkový. Stejně jako u lineárního motoru se železným jádrem, i u tohoto typu motoru je primární díl pohyblivou částí. Jelikož obsahuje cívky, které musí být napájené, je zde nutnost pohyblivého přívodního kabelu. V primárním dílu jsou v určitém místě mezi cívkami uloženy teplotní senzory a hallova sonda [21].

5.2.2 Sekundární díl

Sekundární díl je tvořen permanentními magnety, které jsou nalepeny na ocelovou desku. Magnety jsou na jedné desce lepeny střídavě severním a jižním pólem. Póly protějščí desky jsou nalepeny proti sobě se souladnými póly, znázorněno na Obrázek 5-4. Výhodou takto protilehlých desek s magnety je, že se snižuje únik magnetického toku [21].



Obrázek 5-4 Uspořádání magnetů u lineárního motoru bez železného jádra, modifikováno z [11]

5.2.3 Nevýhody lineárního motoru bez železného jádra

V následujících podkapitolách budou shrnuty nejdůležitější nevýhody lineárních motorů bez železného jádra, jako jsou ztráty spojené s konkrétním konstrukčním řešením.

5.2.3.1 Nižší strukturální tuhost primárního dílu

S cívkami připojenými k primárnímu dílu pomocí epoxidu je vlastní tuhost motoru podstatně menší než u zmíněných dvou typů motorů. To má svůj původ v tuhosti materiálu epoxidu a ve tvarovém faktoru elektromagnetických cívek. Kvůli uložení cívek souběžně s permanentními magnety není motor schopen vytvořit tak velkou tahovou sílu, jako u předchozího typu motoru. Tato snížená tuhost je jedním z důvodů omezení síly motoru a také to omezuje maximální možnou velikost motoru [21].

5.2.3.2 Snížený odvod tepla

Protože motor neobsahuje železné jádro, nedosahuje motor takových sil jako motor s železným jádrem. Proto je přidána druhá řada magnetů, aby zvýšila síly motoru. Za účelem získání této druhé řady magnetů je použita struktura, kdy magnety obklopují cívky z obou stran. S touto konstrukcí však nastává problém, kdy spolu s cívkami, které zůstávají uvnitř během provozu, se snižuje tok vzduchu v oblasti, což způsobuje, že se vytváří teplo uvnitř cívek. Kromě toho má epoxid ve srovnání se železem velmi nízkou tepelnou vodivost. Výsledkem těchto dvou faktorů je snížený přenos tepla. Tento nízký přenos tepla mnohokrát vyžaduje přidání chladiče, kdy je ochlazován nosný hliníkový rám. Dalším způsobem, jak

můžeme ochladit motor, je přes vzduchovou mezeru, ale ani jeden z těchto způsobů není příliš efektivní. Jednou z možností, jak dosáhnout efektivnější chlazení, které by zvýšilo výkon motoru je, že by se cívky rozdělily do dvou vrstev, mezi které by se mohl následně vložit chladicí systém [21].

5.2.3.3 Nižší provozní teplota

Nízký přenos tepla motoru z oblastí, které produkují teplo, omezuje provozní teplotu motoru. Je to kvůli tomu, že jsou cívky zalité v epoxidu. Jako třída materiálů mají epoxidy a plasty nízké provozní teploty. I když nemusí začít hořet při teplotách blízkých jiným typům motorů, při těchto zvýšených teplotách ztratí značné množství materiálové pevnosti a tuhosti. Za účelem udržení výkonu a integrity motoru jsou provozní teploty motorů bez železného jádra nižší než u ostatních typů lineárních motorů [21].

5.2.3.4 Vyšší náklady

Pravděpodobně největší náklady, které při výrobě tohoto typu motoru jsou, tvoří magnety ze vzácných zemin. Oproti předchozímu typu motoru, na stejně dlouhou trasu, tvořenou sekundárními díly, spotřebujeme při této topologii jednou tolik magnetů. S tím souvisí i vyšší cena konečného produktu [21].

5.2.4 Výhody lineárního motoru bez železného jádra

Protože motor neobsahuje železo, netvoří se v něm žádná přitažlivá síla mezi primárním a sekundárním dílem. Díky tomu se v motoru netvoří zádržné síly, které by narušovaly plynulost pohybu primárního dílu. Díky plynulosti pohybu nezatíženého coggingem se zvýší přesnost řízení pohonu a s tím spojené polohování. Za další výhodu by se mohla považovat také hmotnost, která je díky absenci železného jádra nižší. Tento typ motoru také vyniká vysokým zrychlením a brzděním [21].

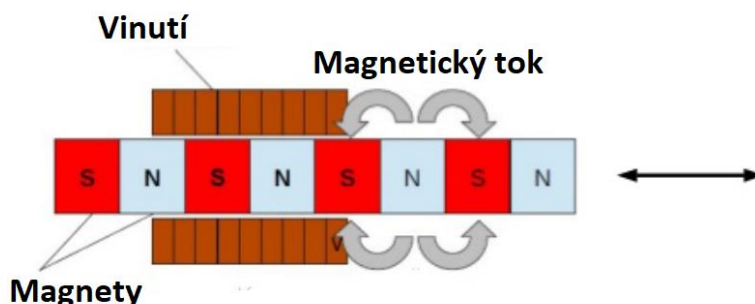
5.2.5 Použití

Nejnámějším použitím lineárního motoru bez železného jádra je vlak Maglev. Avšak v tomto případě není sekundární část tvořena permanentními magnety, jako tomu je u popsaného motoru, ale stacionárním trojfázovým vinutím bez železného jádra, které je umístěné podél tratě. Primární díl je také tvořen cívkami bez železného jádra, které jsou umístěné na palubě vlaku. Další možnosti použití jsou v osazovacích automatech, díky jejich rychlosti a přesnosti, kde není zapotřebí vysoká síla [21].

5.3 Tubulární lineární motor

Tubulární lineární motor umožňuje použít levnější ferritové magnety (oproti magnetům ze vzácných zemin) je tubulární lineární motor. To je umožněno díky speciální topologii motoru,

kdy jsou magnety obklopeny cívkami. I přes cenově atraktivnější ferritové magnety se v tubulárních motorech běžně setkáme s magnety ze vzácných zemin [19],[20], [21].



Obrázek 5-5 Tubulární lineární motor, modifikováno z [29]

5.3.1 Konstrukce tubulárního lineárního motoru

Primární část motoru je obvykle tvořena třífázovým vinutím, které je vloženo ve drážkách nemagnetické oceli. U tohoto typu motoru cívky obklopují celý sekundární díl. Sekundární část je tvořena tyčí (trubkou), ve které jsou uloženy magnety. Orientace magnetických pólů u tohoto tvaru magnetu vytváří magnetický tok 90° vzhledem k cívkám [21], [29].

5.3.2 Nevýhody tubulárního lineárního motoru

Nevýhodou tohoto typu motoru je jeho omezená délka pohybu. Delší provedení nemusí být stabilní. Dalším negativním faktorem může být hmotnost, která bývá u tohoto typu motoru obvykle zmiňována. Tento motor je kvůli své konstrukci relativně těžký. Podle [30] je u tubulárních lineárních motorů dráha limitovaná na maximálně 3,5 m pro aplikace s velkými silami [29].

5.3.3 Výhody tubulárního lineárního motoru

Hlavní výhodou tubulárních lineárních motorů oproti předchozím typům je jejich vysoká účinnost. Lineární motory pracují na principu Lorentzovy síly, která uvádí, že když je vodič s proudem (stator) umístěn do magnetického pole, které je kolmé na proud, je na vodiči generována síla. Směr síly je kolmý jak k magnetickému poli, tak k proudu. Konstrukce tubulárním lineárním motorům umožňuje, aby celá cívka (nejen část cívky, jako u předchozích dvou provedení) byla kolmá k magnetickému toku, takže veškerý proud se používá ke generování síly ve směru posunu. Vysoce účinná zařízení generují méně tepla, takže není nutné chlazení. Výsledkem je lepší přesnost polohování, což je obzvláště důležité pro řezání, obrábění nebo dávkování. Ačkoli některé designy jsou dostupné se statory ze železného jádra pro získání vyšší síly, většina tubulárních motorů je bez železa, takže nemají žádný cogging a produkují velmi plynulý pohyb [21], [29].

5.3.4 Použití

Tato konstrukce poskytuje alternativu k pneumatickým nebo šroubovým pohonům tyčového typu. V tahových aplikacích ve tvaru tyče poskytují lineární motory vysokou rychlost a

zrychlení, schopnost odolávat vysokým pracovním cyklům a přesné polohování. Používají se u kompresorů a v průmyslových automatech. Tento typ motorů se používá například u vrtání tištěných spojů, kde je důležitá přesnost [29].

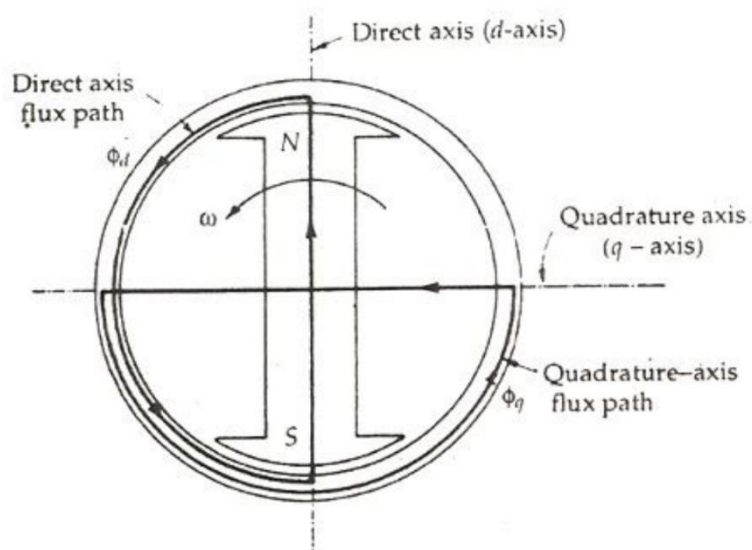
6 Metody výpočtu

U lineárních motorů je důležité pro správnou analýzu, design a optimalizaci určit ztráty v železe. Na druhé straně přesnost modelování magnetické indukce v různých částech stroje, konkrétně v zubech, může být pro výpočet ztrát kritické. Magnetické obvody můžeme počítat různými metodami. Analytickou metodou, numerickou metodou nebo za pomoci odporové sítě.

6.1 Analytická metoda

Analytická metoda stojí na řešení pomocí Maxwellových rovnic v různých částech stroje. Tyto metody se snaží zjistit výrazy v uzavřené formě pro magnetické pole a ztráty. Analytické metody mohou pozorovat saturaci, která má významný vliv na magnetické pole a ztráty motorů. Obtížně mohou simulovat efekt drážky a rozptyl magnetického toku [17].

U analytické metody je možné vzít v potaz nelinearitu magnetického materiálu, které ovlivňuje velikost magnetického odporu v daném místě. U synchronních motorů s permanentními magnety se používá dvouosý model reaktancí. Jedná se o osy q (z anglického „quadrature axis“) a osy d (z anglického „direct axis“), které je možné vidět na obrázku 6-1.



Obrázek 6-1 Zobrazení q -osy a d -osy u rotačního motoru, převzato z [32]

Zejména nasycení reaktance v q -ose bývá obvykle zanedbáváno. To může způsobit nepřesné výsledky například u synchronního motoru s permanentními magnety s magnety v rotoru, které mají větší délku aktivního železa podél d -osy. U těchto motorů je saturace výrazně vyšší i za normálních podmínek. Proto je důležité zahrnout jak saturaci v d -ose, tak v q -ose, neboť zanedbáním nasycení q -osy má za následek menší hodnoty reaktance. A protože nasycení probíhá v obou osách, pak se parametry dvouosého modelu mění nelineárně v závislosti na provozních podmínkách. Proto pro přesnou analýzu by se neměla saturace zanedbávat a díky tomu vypočtené parametry odpovídají více reálným parametrům. Bylo prokázáno v článku [17], že při porovnání výsledků se zanedbáním a bez zanedbání nasycení došlo k velkým rozdílům.

Avšak u vysoce výkonových strojů s permanentními magnety, které mají obvykle složitou strukturu rotoru, je obtížné správně definovat magnetické pole ve vzduchové mezeře pomocí rovnic, a proto se u tohoto typu motorů tato metoda nedoporučuje [16].

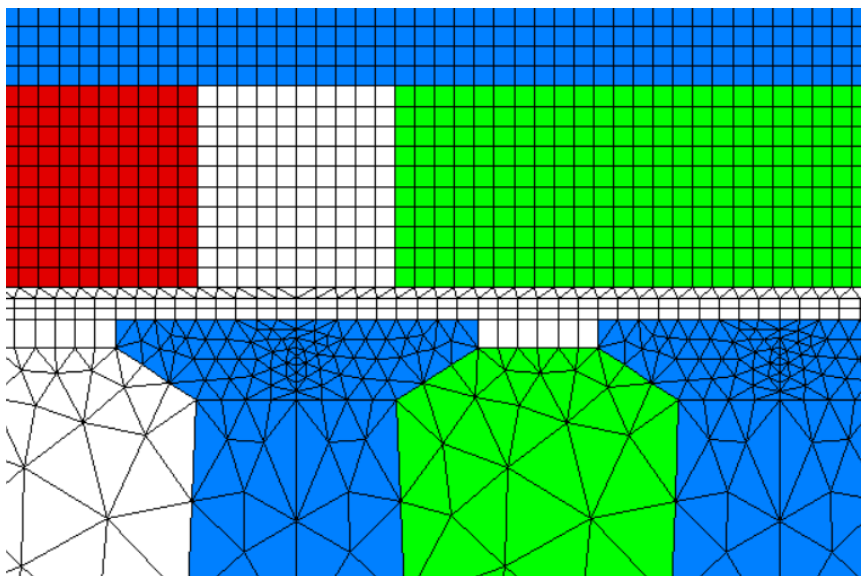
6.2 Metoda konečných prvků

Numerické metody jako například metoda konečných prvků jsou často používané pro výpočet magnetického pole a ztrát u strojů s permanentními magnety. Přestože jsou velmi přesné, jsou časově náročné a těžko je lze použít při iteračních optimalizacích návrhu motoru a počátečních konstrukčních postupech, kde se několik parametrů mění v širokém rozmezí [12].

Metoda konečných prvků byla vyvinuta koncem 50. let pro potřeby leteckého, kosmického a vojenského průmyslu. K rozvoji a rozšíření této metody došlo při rozvoji výpočetní techniky. Touto metodou je možné řešit nejen magnetické obvody, ale třeba i proudění tekutin a vedení tepla [25].

Metoda konečných prvků vyžaduje rozdělení řešené oblasti na konečný počet prvků. Tímto způsobem vznikne síť prvků skládající se z propojených uzlů, ve kterých probíhá zjišťování hledaných parametrů. Popis fyzikálních zákonů pro prostorově a časově závislé problémy je obvykle vyjádřen pomocí parciálních diferenciálních rovnic, které jsou řešeny numericky. Spojitý systém je tedy nahrazován jeho přibližným diskrétním modelem o konečném počtu prvků. Jednou z výhod použití metody konečných prvků je to, že nabízí velkou svobodu při výběru diskretizace a to jak v prvcích, které mohou být použity k diskretizaci prostoru, tak základních funkcí. Pro každý typ prvku je charakteristický počet a poloha jeho uzlů. V místech, kde jsou očekávány větší změny magnetického toku a sycení železa, volíme větší hustotu sítě než v místech, kde jsou očekávány změny menší. Hustota prvků sítě zásadně ovlivňuje kvalitu řešených výsledků [31].

Na obrázku 6-1 je vidět vytvořená síť za pomoci metody konečných prvků v programu Femag. Největší důraz je kladen na vzduchovou mezeru. Je důležité, aby vytvořená síť ve vzduchové mezeře byla tvořena čtverci nebo obdélníky, aby výpočet byl přesnější a rychlejší. Pro dynamický výpočet, kdy model koná pohyb, je vhodné, aby byl model tvořen obdélníky kvůli vyšší přesnosti výpočtu. Pro statický výpočet není nutné, aby byl model ve vzduchové mezeře tvořen odelníky. Ve vzduchové mezeře je také důležité vytvořit síť hustější než například v zubech a vinutí, aby byl správně vypočítán přestup magnetického toku [25].



Obrázek 6-2 Síť vytvořená za pomoci metody konečných prvků

Tato metoda využívá integrál, který se počítá přes elementární plochy, v jejichž vrcholech jsou uzly. Problémem je správná volba hustoty sítě. Při zvolení malého počtu uzlů je výsledek vypočten rychle, ale hodnoty, které získáme, jsou nepřesné a spíše jen orientační. Naopak při zvolení velkého počtu uzlů je doba výpočtu dlouhá, ale výsledek je přesný. Proto při příliš velké hustotě sítě a nutnosti nového výpočtu při každé změně vstupních parametrů je zapotřebí volit počet uzlů takový, aby vyhovoval výpočet požadované přesnosti a zároveň nebyla časová náročnost příliš vysoká. Metoda konečných prvků dává vždy jeden výsledek v konečném počtu uzlů sítě. V případě jakékoliv změny vstupních parametrů je nutné znovu spustit výpočet pro získání nového výsledku [25].

6.3 Metoda odporových sítí

Využití odporové sítě má v posledních letech velké využití při návrhu a optimalizaci motorů s permanentními magnety. Tato metoda je kompromis mezi přesností a rychlostí výpočtu. Pomocí odporových sítí je možné modelovat nelinearitu železného jádra motoru. Odporové sítě slouží k prvotním návrhům, které jsou poté zkontrolovány a zpřesněny za pomoci metody konečných prvků.

Výpočet magnetického odporu vychází z Hopkinsonova zákona, který je analogií Ohmova zákona u elektrických obvodů. Hopkinsonův zákon vyjadřuje vztah mezi magnetickým tokem, magnetickým napětím a magnetickým odporem [10],[15].

$$U_m = R_m \cdot \Phi \quad (6.3-1)$$

kde U_m je magnetické napětí [A], R_m je magnetický odpor [H^{-1}] a Φ je magnetický tok [Wb] [10].

Magnetický odpor materiálu můžeme obecně určit z Hopkinsonova zákona ze vzorce:

$$R_m = \frac{U_m}{\Phi} \quad (6.3-2)$$

Magnetické napětí U_m můžeme dle Ampérova zákona zapsat jako součin intenzity magnetického pole a délky uzavírané magnetické siločáry.

$$U_m = \int_l \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (6.3-3)$$

kde H je intenzita magnetického pole [Am^{-1}] a l je délka uzavírané magnetické siločáry [m] [10].

Magnetický tok Φ je definován jako počet indukčních čar v magnetickém poli. Magnetický tok je vybuzen zdrojem magnetického pole, kterým je buď magnet, nebo elektrický proud, který prochází vodičem [10].

Magnetický tok vytvořený magnetickou indukcí B na ploše S vyjádříme jako:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (6.3-4)$$

kde B je magnetická indukce [T] a S je plocha kolmá k procházejícím indukčním siločárám [m^2] [10].

Magnetická indukce je veličina, která je závislá na prostředí, ve kterém se nachází, proto ji můžeme vyjádřit:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (6.3-5)$$

kde B je magnetická indukce [T], μ_0 je permeabilita vakua [H/m] a μ_r je permeabilita prostředí [H/m] [10].

Když nyní dosadíme do vzorce (6.3-2) získáme:

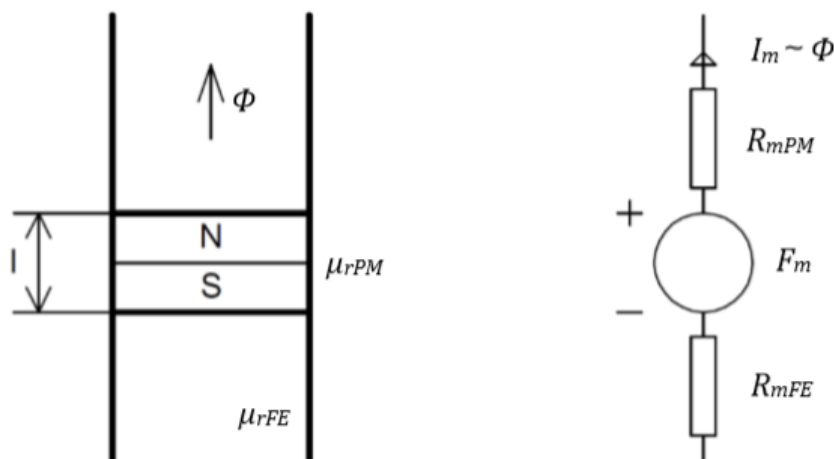
$$R_m = \frac{H \cdot l}{B \cdot S} \quad (6.3-6)$$

Pokud za magnetickou indukci B dosadíme (6.3-5) získáme po úpravě finální tvar:

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} \quad (6.3-7)$$

kde l je střední délka magnetické siločáry v [m] a S je plocha kolmá k procházejícím indukčním siločárám [m^2] [10],[15].

Díky analogii Hopkinsonova a Ohmova zákona můžeme zdroj magnetického napětí v odporové síti reprezentovat jako zdroj elektrického napětí, jak můžeme vidět na obrázcích Obrázek 6-3 a Obrázek 6-4.



Obrázek 6-3 Analogie magnetického obvodu a elektrického obvodu, cívka, převzato z [15]

Zdroj magnetického napětí v magnetickém obvodu je možné nahradit jako zdroj napětí vložený mezi dva odpory. Z takto upraveného obvodu můžeme vypočítat magnetický tok. Tok je dán velikostí remanentní magnetické indukce, která je dána vlastnostmi materiálu a plochou permanentního magnetu, jak je možné vidět ve vzorci:

$$\Phi = B_r \cdot S_{PM} \quad (6.3-8)$$

kde Φ je magnetický tok [Wb], B_r remanentní magnetická indukce [T] a S_{PM} je plocha permanentního magnetu kolmá k magnetickým siločarám [m²] [10].

Výpočet magnetomotorického napětí pro permanentní magnety je roven celkovému proudu, který vyvolal indukční čáru, která je rovna délce l .

$$F_m = \sum_{k=1} I_k \quad (6.3-9)$$

kde F_m je magnetomotorické napětí [A] a I_k proud procházející vodičem [A] [10].

Pro předem známý tvar indukčních čar, kdy je intenzita magnetického pole podél indukční čáry konstatní, je velikost proudu rovna:

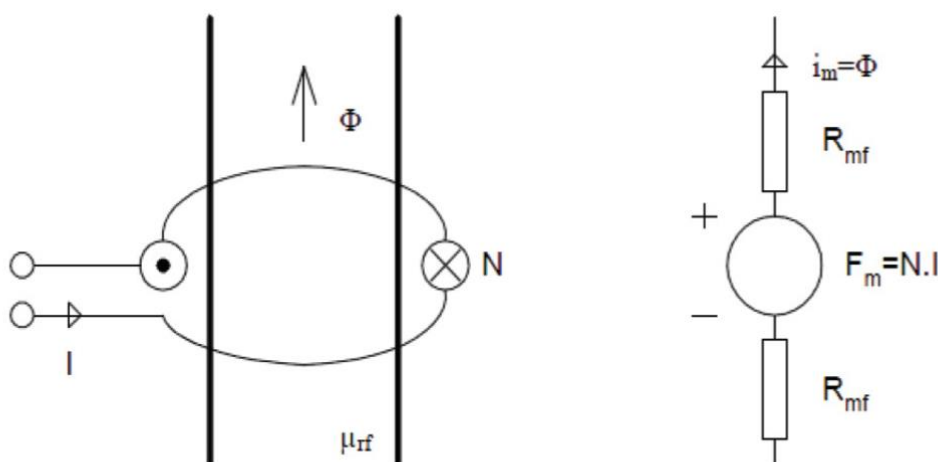
$$I = H \cdot l \quad (6.3-10)$$

kde H je intenzita magnetického pole [Am^{-1}], l je délka indukční čáry [m] a I je velikost celkového proudu [A] [10].

Po dosazení rovnice (6.3-10) a (6.3-5) do rovnice (6.3-9) získáme:

$$F_{mPM} = \frac{B_r \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r} \quad (6.3-11)$$

kde F_{mPM} je velikost magnetomotorického napětí generovaného permanentním magnetem [A] [10].



Obrázek 6-4 Analogie magnetického obvodu a elektrického obvodu, cívka, převzato z [15]

Stejně jako permanentní magnet můžeme v magnetickém obvodu nahradit cívku elektrickým obvodem jako zdroj vložený mezi dva odpory. Díky provázanosti Ohmova a Hopkinsonova zákona je možné popsat cívku jako zdroj magnetomotorického napětí.

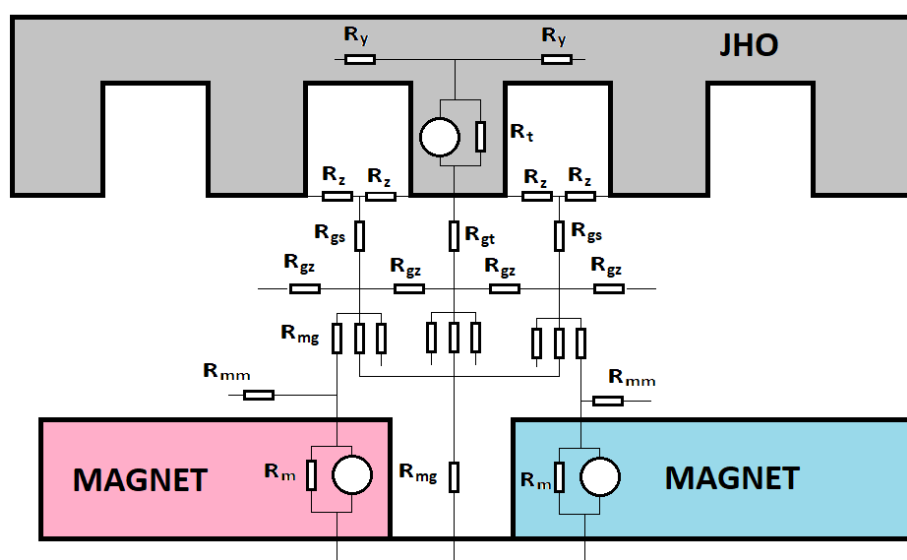
$$\sum U_m = F_m = N \cdot I \quad (6.3-12)$$

kde F_m je magnetomotorické napětí [A], N je počet závitů [-] a I je velikost proudu [A] [15], [10].

7 Model odporové sítě lineárního motoru

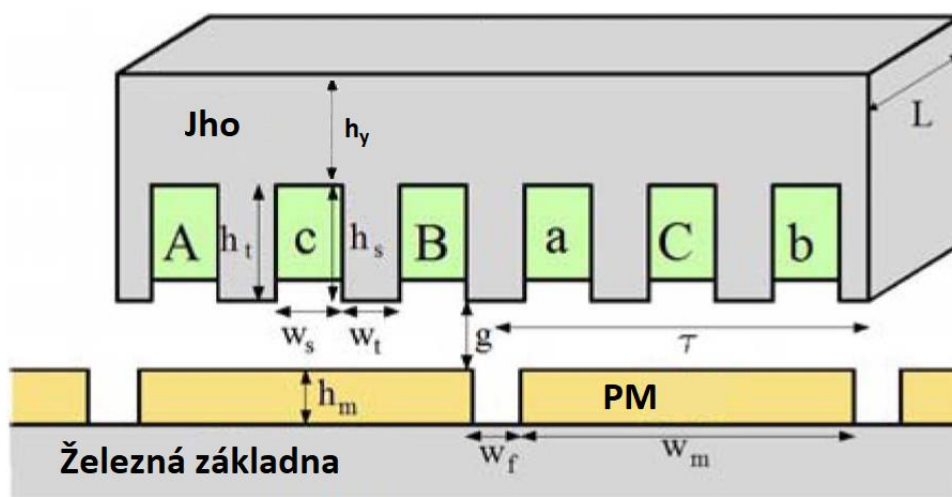
U odporových sítí se setkáváme se třemi základními typy prostředí. Permanentní magnet, který má lineární charakteristiku permeability stejně jako vzduchová mezera, které vlivem magnetické indukce nemění svoji hodnotu. Odpor železa motoru je na simulaci nejsložitější, protože je typický tím, že má nelineární charakteristiku permeability. Na zjednodušeném modelu na obrázku 7-1 je možné vidět, jak je možné představit si magnetický obvod lineárního motoru v odporové síti, kde je nahrazen elektrickým obvodem. Je zde zobrazena pouze část obvodu. Jednotlivé části budou dále podrobněji popsány a vysvětlené v následujících kapitolách.

Takto sestavený model odporové sítě vychází ze článku [12], který se touto problematikou zabývá. Výsledky simulace byly poté porovnány s výsledky metody konečných prvků. Výsledky se výrazně nelišily, záleží na vhodně zvolené odporové síti.



Obrázek 7-1 Ekvivalentní magnetický model lineárního motoru modifikováno z [12]

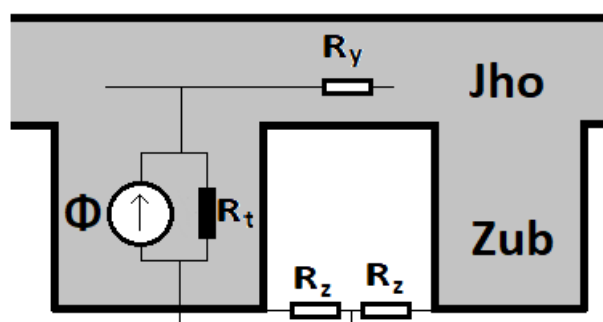
Pro přehlednost na Obrázek 7-2 jsou zaznačené délky jednotlivých částí stroje, které následně budou využité při výpočtech odporů.



Obrázek 7-2 Okótovaný zjednodušený model lineárního motoru se železným jádrem modifikováno z [12]

7.1 Primární díl

První částí, která bude podrobněji přiblížena, bude primární díl. Ten je tvořen zdrojem magnetického toku s paralelní nelineárním R_t . Dále se zde nacházejí reluktance R_z reprezentující vzduch v drážce a reluktance R_y , která reprezentuje J_{ho} [12].



Obrázek 7-3 Ekvivalentní magnetický model primární části, modifikováno z [12]

Reluktance mohou být vypočítány za pomoci Ampérova zákona. Velikosti elementů primární části stroje jsou dány vztahy:

$$R_y = \frac{w_s + w_t}{\mu_0 \mu_r(B_t) \cdot h_y \cdot L} \quad (7.1-1)$$

$$R_t = \frac{h_t}{2 \cdot \mu_0 \mu_r(B_t) \cdot w_t \cdot L} \quad (7.1-2)$$

$$R_z = \frac{w_s}{\mu_0 \cdot h_s \cdot L} \quad (7.1-3)$$

Kde R_t je reluktance zubu [H^{-1}], R_y je magnetický odpor elementu jha [H^{-1}], R_z je magnetický odpor elementu vzduchové mezery mezi zuby [H^{-1}], w_s je šířka drážky [m], w_t je šířka zubu [m], L je délka motorového svazku [m], h_y je výška jha [m], h_t je výška zubu primárního dílu [m], h_s je výška drážky [m], μ_0 je permeabilita vakua [H/m] a $\mu_r(B_t)$ je relativní permeabilita materiálu [-] jako funkce magnetické indukce B_t [T] [12].

Výjimku reluktancí tvoří okrajové elementy R_{ye} a R_{te} , kde zub primárního dílu nemá stejný rozměr, ale je menší.

Magnetické napětí jednotlivých zubů primární části vypočítáme podle následujících vztahů:

$$U_{m1} = -N_c \cdot i_A \quad (7.1-4)$$

$$U_{m2} = N_c \cdot (-i_A + i_C) \quad (7.1-5)$$

$$U_{m3} = N_c \cdot (-i_A + i_C - i_B) \quad (7.1-6)$$

$$U_{m4} = N_c \cdot (-i_B + i_C) \quad (7.1-7)$$

$$U_{m5} = -N_c \cdot i_B \quad (7.1-8)$$

Kde U_{mn} je magnetické napětí v n-tém zubu [A], N_c je počet závitů cívky [-] a $i_{A,B,C}$ jsou okamžité hodnoty proudů v jednotlivých fázích [A] [12].

Okamžité proudy jednotlivých fází $i_{A,B,C}$ vypočítáme jako:

$$i_A = I_m \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \chi}{\tau} + \Phi_0\right) \quad (7.1-9)$$

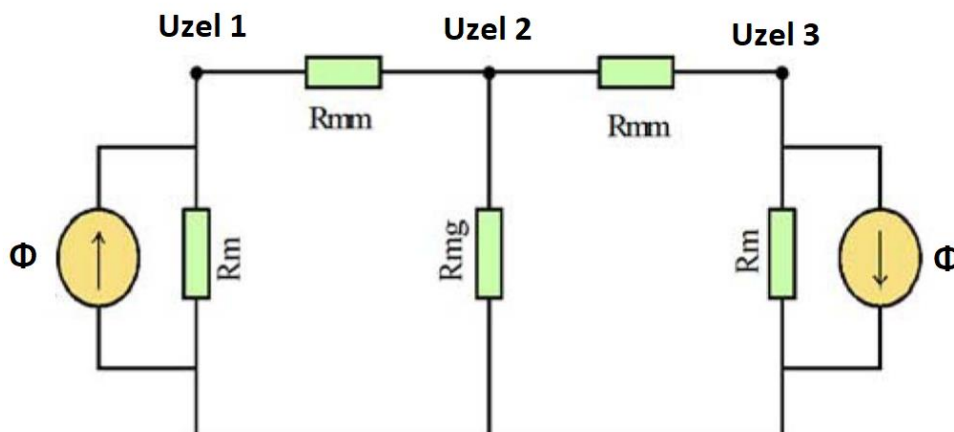
$$i_B = I_m \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \chi}{\tau} - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \Phi_0\right) \quad (7.1-10)$$

$$i_C = I_m \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \chi}{\tau} + \frac{2 \cdot \pi}{3} + \Phi_0\right) \quad (7.1-11)$$

Kde I_m je amplituda proudu vinutím [A], χ je pozice primární části motoru [m], τ je pólová rozteč [m] a Φ_0 je fázový posun [rad] [12].

7.2 Sekundární díl

Sekundární díl je tvořen magnety, které jsou reprezentovány jako zdroje magnetického toku s paralelní reluktancí R_m , jako tomu bylo u zubu primárního dílu. Zdroje mají proti sobě opačnou polaritu, stejně jako se v reálném stavu střídají magnetické póly. Reluktance R_{mg} reprezentuje mezeru mezi magnety a reluktance R_{mm} jsou rozptylové reluktance [12].



Obrázek 7-4 Ekvivalentní magnetický model sekundární části, modifikováno z [12]

Jednotlivé vztahy reluktancí a magnetické napětí magnetu odporové sítě sekundárního dílu vypočítáme jako:

$$R_{mm} = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot L}{\pi} \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot g}{w_f} \right)} \quad (7.2-1)$$

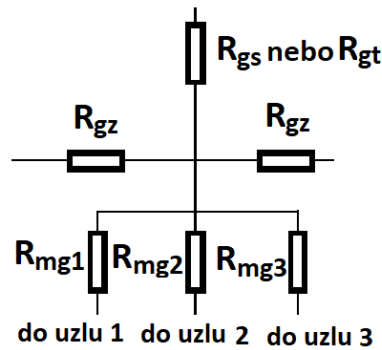
$$R_m = \frac{h_m}{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rm} \cdot w_m \cdot L} \quad (7.2-2)$$

$$U_{m-PM} = \frac{B_r \cdot h_m}{\mu_0 \cdot \mu_r} \quad (7.2-3)$$

Kde R_{mm} je rozptylová reluktance permanentního magnetu [H^{-1}], R_m je reluktance permanentního magnetu [H^{-1}], w_f je šířka vzduchové mezery mezi permanentními magnety [m], h_m je výška permanentního magnetu [m], w_m je šířka permanentního magnetu [m], B_r je remanentní magnetická indukce permanentního magnetu [T], L je délka svazku plechů [m], a μ_{rm} je relativní permeabilita magnetu [-] [12].

7.3 Vzduchová mezera

Vzduchová mezera je rozdělena na dvě části, a to na část mezi primární částí a středem a na část mezi středem a sekundární částí. První část mezi středem a primární částí je tvořena reluktancemi R_{gs} , R_{gt} a R_{gz} . Druhá část je tvořena reluktancemi R_{mg} , jak můžeme vidět na obrázku 7-5 [12].



Obrázek 7-5 Ekvivalentní magnetický model vzduchové mezery, modifikováno z [12]

Reluktance vzduchové mezery jsou také odvozené pomocí Ampérova zákona. Jednotlivé reluktance vypočítáme jako:

$$R_{gz} = \frac{\tau_s}{2 \cdot \mu_0 \cdot L \cdot g} \quad (7.3-1)$$

$$R_{gs} = \frac{g}{2 \cdot \mu_0 \cdot w_s \cdot L} \quad (7.3-2)$$

$$R_{gt} = \frac{g}{2 \cdot \mu_0 \cdot w_t \cdot L} \quad (7.3-3)$$

$$R_{gmi} = \frac{g}{2 \cdot \mu_0 \cdot \tau_s \cdot L \cdot \alpha_i} \quad (7.3-4)$$

Kde R_{gz} je reluktance horizontálního elementu vzduchové mezery [H^{-1}], R_{gs} je reluktance vzduchové mezery pod drážkou [H^{-1}], R_{gt} je reluktance vzduchové mezery pod zubem [H^{-1}], R_{mgi} je reluktance vzduchové mezery v závislosti na vzájemné poloze i -tého zubu a permanentního magnetu [H^{-1}], τ_s je pólová rozteč [m], g je šířka vzduchové mezery [m], L je délka motorového svazku [m], w_s je šířka drážky [m], w_t je šířka zubu [m] a α_i je činitel vzájemné polohy zubu a permanentního magnetu [-] [12].

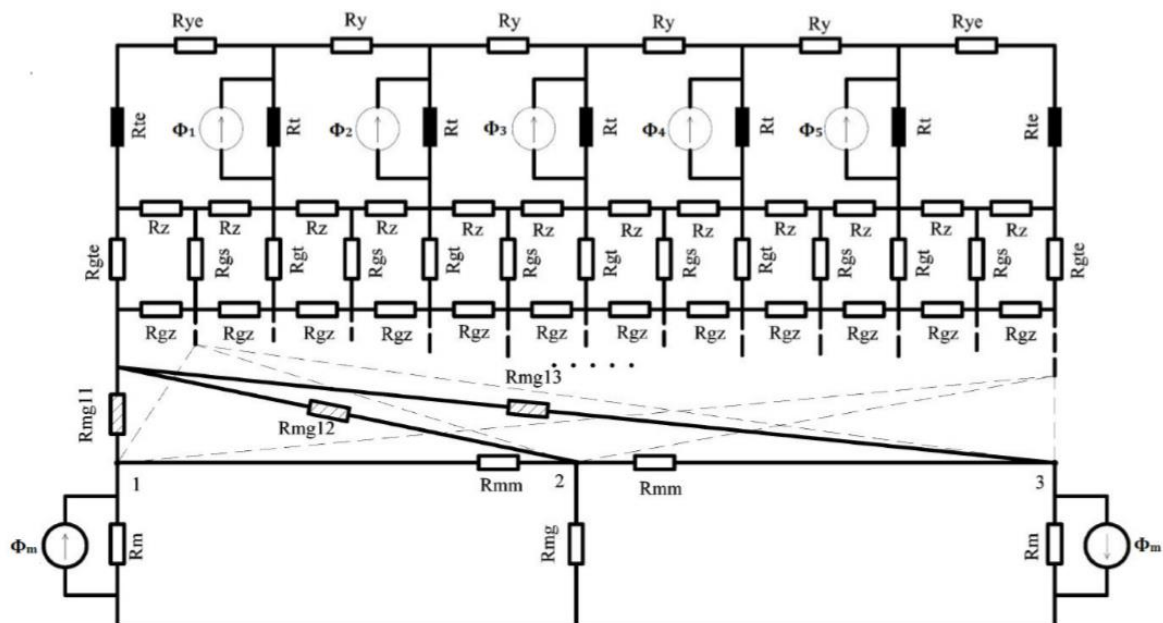
Činitel vzájemné polohy α_i vypočítáme jako:

$$\alpha_i = \frac{w_{t,s-nad PM}}{w_{t,s}} \quad (7.3-5)$$

Kde $w_{t,s-nad PM}$ je šířka zubu nebo drážky nad permanentním magnetem [m] a $w_{t,s}$ je šířka zubu nebo drážky [m] [12].

7.4 Celkový model odporové sítě

Složením všech tří dříve zmiňovaných částí získáme kompletní schéma odporové sítě viz Obrázek 7-6. Tato síť bude následně simulována za pomoci programu Matlab.



Obrázek 7-6 Celkový model odporové sítě zjednodušeného lineárního motoru, modifikováno z [12]

7.5 Sestavení odporové sítě

Jak již bylo zmíněno, odporová síť bude vytvořena za pomoci programu Matlab. Model bude řešen pomocí druhého Kirchhoffova zákona.

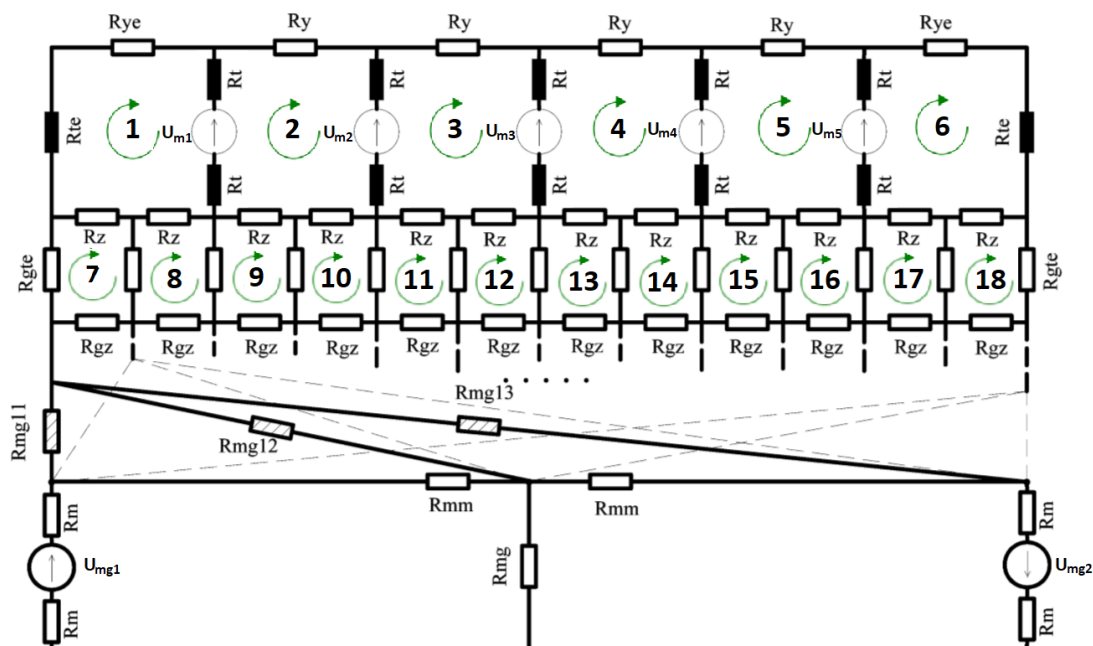
1. Kirchhoffův zákon říká: Algebraický součet všech proudů v uzlu se rovná nule.
2. Kirchhoffův zákon říká: Algebraický součet všech napětí zdrojů a všech úbytků napětí na spotřebičích se v uzavřené smyčce rovná nule.

Pro výpočet motoru byla vybrána metoda smyčkových proudů, protože díky ní je možné vypočítat velké množství rovnic, kterými je model tvořený. Takto vytvořený model také nepotřebuje žádný speciálně navržený software pro řešení elektrických obvodů, neboť pomocí smyčkových proudů získáme soustavu rovnic. Tato metoda vychází z druhého Kirchhoffova zákona. Jde o to, aby bylo sestaveno tolik rovnic, kolik obvod obsahuje smyček, které na sobě nebudou navzájem závislé. Je vhodné volit směr smyčkových proudů ve všech smyčkách stejný. V tom případě jsou úbytky v aktuálně řešené smyčce kladné a v sousedních smyčkách záporné.

Pro zjednodušení výpočtu došlo oproti Obrázek 7-67-6 k několika drobným úpravám. Zdroje magnetického toku byly změněny na zdroje magnetického napětí. Ke zdroji byly přidány místo jednoho paralelního odporu R_t dva odpory R_t v sérii, mezi které byl vložen zdroj. Ke stejné úpravě bylo přikročeno i u magnetů, kde byl zdroj magnetického toku změněn na zdroj magnetického napětí, který byl vložen mezi odpory R_m . Takto upravený model odporové sítě je možné vidět na obrázku 7-7.

Tím se zároveň zjednodušil obvod pro řešení za pomoci smyčkových proudů, jelikož se tím nepatrně zredukoval počet smyček. Po těchto úpravách byly sestaveny rovnice jednotlivých

smyček, které byly zadány do programu matlab a vypočítány ze zadaných rozměrů určitého motoru.



Obrázek 7-7 Upravený celkový model odporové sítě zjednodušeného lineárního motoru s vyznačenými smyčkami, modifikováno z [12]

Na obrázku 7-7 je možné vidět část naznačených smyček, podle kterých byly vytvořeny rovnice, nezbytné pro výpočet. Kvůli přehlednosti a zjednodušenému zobrazení vzduchové mezery nejsou zakresleny smyčky ve vzduchové mezeře a následně ani v magnetech. Příklad vytvořené rovnice je pro první smyčku.

$$(R_{te} + R_{ye}) \cdot \Phi_1 + 2 \cdot R_t \cdot (\Phi_1 - \Phi_2) + R_z \cdot (\Phi_1 - \Phi_8) + R_z \cdot (\Phi_1 - \Phi_7) = U_{m1} \quad (7.5-1)$$

Stejným způsobem jako rovnice (7.5-1) byly následně vytvořeny rovnice v celém modelu lineárního motoru. Rovnici je nutné následně upravit:

$$(R_{te} + R_{ye} + 2 \cdot R_t + 2 \cdot R_z) \cdot \Phi_1 - 2 \cdot R_t \cdot \Phi_2 - R_z \cdot \Phi_8 - R_z \cdot \Phi_7 = U_{m1} \quad (7.5-2)$$

S takto upravenou rovnicí je možné v soustavě rovnic vyjádřit hledané toky v jednotlivých smyčkách. Soustava rovnic byla vyřešena za pomoci programu Matlab.

7.6 Výpočet magnetické indukce

Kvůli možnému úniku choullostivých dat není možné do výpočtů dosazovat konkrétní hodnoty. Hledaným výsledkem metody odporové sítě je velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Pomocí metody odporové sítě se získá velikost magnetického toku. Magnetická indukce se následně vypočítá po úpravě vztahu (6.3-8) jako:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{131 \cdot 10^{-6}}{300 \cdot 10^{-6}} = 0,44 \text{ T} \quad (7.6-1)$$

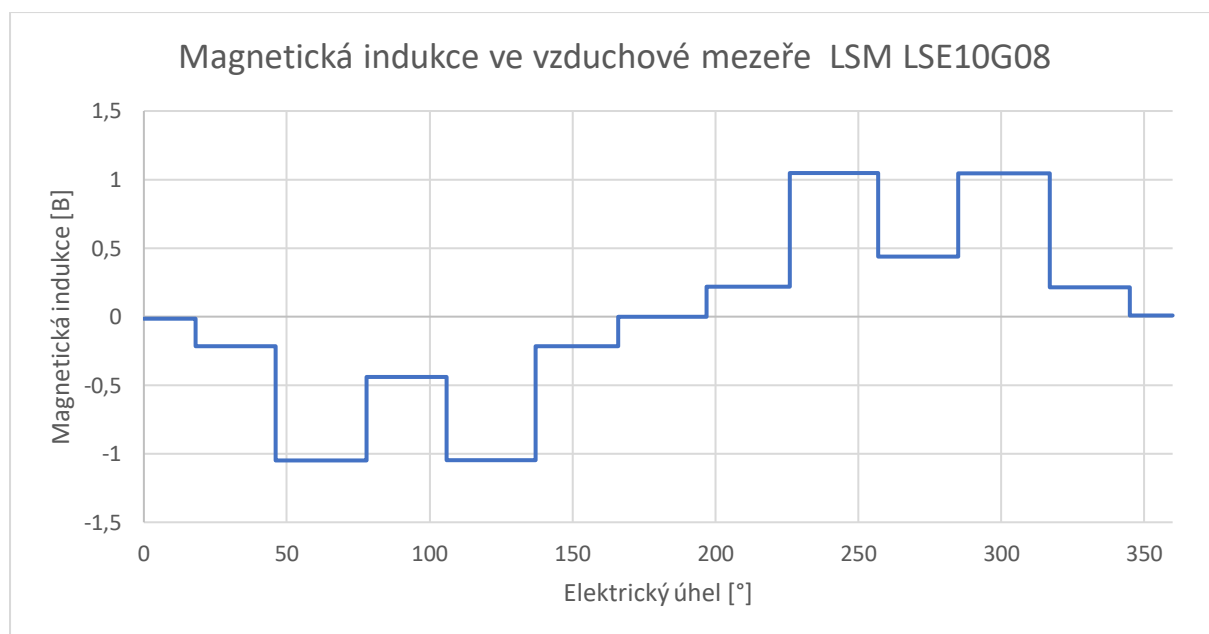
Kde B je magnetická indukce [T], S je příslušná plocha vzduchové mezery [m²] a Φ je velikost magnetického toku [Wb].

Výpočet magnetické indukce ve všech potřebných uzlech je shrnuta v Tabulka 2:

Tabulka 2 Výpočet magnetické indukce ve vzduchové mezeře

	Φ	R	S_{fe}	B
	[μ Wb]	[-]	[mm ²]	[T]
1	3	Rgte	175	0,02
2	65	Rgs	300	0,22
3	315	Rgt	300	1,05
4	131	Rgs	300	0,44
5	315	Rgt	300	1,05
6	65	Rgs	300	0,22
7	0	Rgt	300	0,00
8	66	Rgs	300	0,22
9	314	Rgt	300	1,05
10	131	Rgs	300	0,44
11	314	Rgt	300	1,05
12	64	Rgs	300	0,21
13	2	Rgte	175	0,01

Výsledné hodnoty magnetické indukce je nutné doplnit o osu x. Jednou z možností je nastavit elektrický úhel. Další možností je závislost magnetické indukce na skutečných rozměrech. Pro zobrazení magnetické indukce ve vzduchové mezeře byla zvolena závislost magnetické indukce na elektrickém úhlu. Elektrický úhel 360° odpovídá dvěma pólům.



Obrázek 7-8 Velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Z průběhu magnetické indukce je názorně vidět, kde se nachází zuby a kde drážky. Pod zubem primárního dílu je magnetická indukce větší vlivem menší reluktance než u drážky, kde je reluktance větší a tomu odpovídá menší magnetická indukce. Krajiními zuby kvůli menším rozměrům teče menší magnetický tok než u ostatních zubů. Ve vzduchové mezeře menší magnetická indukce. Pro následující výpočet posuvné síly bude použita maximální magnetická indukce, která odpovídá 1,05 T.

7.7 Výpočet posuvné síly

Posuvná síla lineárního motoru se vypočítá za pomoci Lorentzova zákona. Je to síla, kterou působí magnetické pole na pohybující se nabitě částice q . Tato síla je úměrná velikosti magnetické indukce B a rychlosti částice v [23].

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (7.7-1)$$

Kde \vec{F} je Lorentzova síla [N], q je velikost náboje [C], \vec{v} je vektor rychlosti částice [ms^{-1}] a \vec{B} je vektor magnetické indukce [T] [23].

Pro zjednodušení vztahu se uvažuje, že rychlost je kolmá na magnetickou indukci, čímž se získá vztah:

$$F = q \cdot v \cdot B \quad (7.7-2)$$

Kde F je velikost posuvné síly [N], q je velikost náboje [N], v je rychlost částice [ms^{-1}] a B je velikost magnetické indukce [T] [23].

Velikost rychlosti je obecně dána vztahem:

$$v = \frac{l}{t} \quad (7.7-3)$$

Kde v rychlost částice [ms^{-1}], l je dráha [m] a t je čas [s] [23].

Obecný vztah pro výpočet velikosti proudu je roven velikosti náboje q , který projde vodičem za jednotku času:

$$I = \frac{q}{t} \quad (7.7-4)$$

Kde I je velikost proudu [A], q je velikost náboje [C] [23].

Po dosazení rovnic (7.7-3) a (7.7-4) do rovnice (7.7-2) vznikne hledaný vztah:

$$F = I \cdot l \cdot B \quad (7.7-5)$$

Kde F je velikost posuvné síly [N], I je velikost proudu [A], l je aktivní délka železa [m] a B je velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře [T] [23].

Pro následující výpočet je kromě velikosti magnetické indukce nutné použít i další hodnoty, které jsou zobrazeny v tabulce 3.

Tabulka 3 Parametry motoru LSE10G08

Posuvná síla	Nominální proud	Počet drážek	Počet pólů
F_N	I_N	Q_{dr}	$2p$
[N]	[A]	[-]	[-]
250	1,9	30	10

Velikost proudu se určí jako:

$$I_{celk} = I_{ef} \cdot N_{dr} \cdot Q_{dr-aktiv} \quad (7.7-6)$$

Kde I_{celk} je celkový proud tekoucí vodiči [A], N_{dr} je počet vodičů v drážce [-], I_{ef} je efektivní proud tekoucí jedním vodičem [A] a $Q_{dr-aktiv}$ je počet aktivních drážek [-] [24].

Počet aktivních drážek je roven rozdílu všech drážek a počtu pólů. Také je nutné od tohoto čísla odečíst ještě jedna, kvůli polovičnímu počtu vodičů v první a poslední drážce motoru. Celkový proud je roven:

$$I_{celk} = I_{ef} \cdot N_{dr} \cdot (Q_{dr} - 2p - 1) = \quad (7.7-7)$$

$$2,687 \cdot 51 \cdot (30 - 10 - 1) = 2603 \text{ A}$$

Kde Q_{dr} je celkový počet drážek [-] a $2p$ je počet pólů [-].

Dosazením vypočtené hodnoty proudu I_{celk} z rovnice (7.7-7) do rovnice (7.7-5) a dosazením maximální hodnoty magnetické indukce z tabulky 2 se vypočte nominální posuvná síla lineárního motoru:

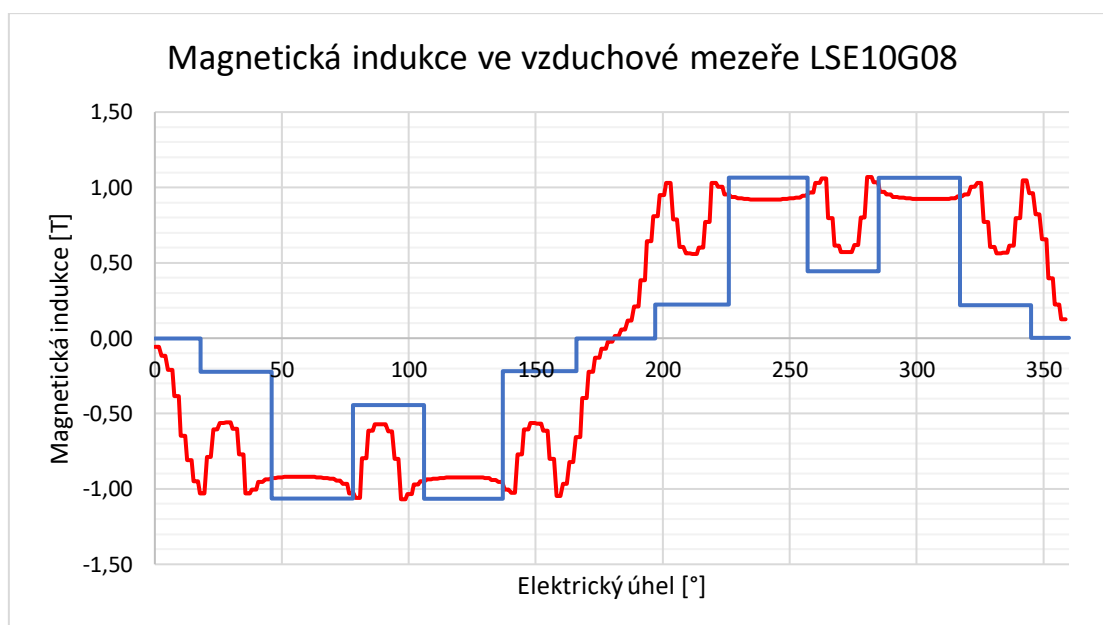
$$F_N = I_{celk} \cdot l_{fe} \cdot B_{max} = 2603 \cdot 0,09 \cdot 1,05 = 246,05 \text{ N} \quad (7.7-8)$$

8 Porovnání výsledků

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6, metoda výpočtu pomocí odporové sítě není tak přesná jako metoda konečných prvků. Je tedy důležité výsledky těchto dvou metod mezi sebou porovnat. Předpokládá se, že metoda konečných prvků bude mít přesnější výsledky než odporová síť, proto je považována za referenční. Další porovnání je za pomoci referenčních katalogových hodnot.

8.1 Porovnání výsledků odporové sítě s metodou konečných prvků

Pro porovnání výsledků se využije hodnot získaných pomocí odporové sítě, které jsou zobrazeny, viz Obrázek 7-8. Pro získání hodnot metodou konečných prvků byl použit model lineárního synchronního motoru se železným jádrem, vytvořený a vypočtený pomocí programu Femag. Výsledky metody konečných prvků byly následně vloženy do grafu a byla jim upravena osa x na elektrický úhel, aby bylo možné výsledky porovnat. Na obrázku 8-1 je znázorněno porovnání metody konečných prvků a odporové sítě.



Obrázek 8-1 Velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře, porovnání MKP a odporové sítě

Z výsledků je patrné, že stejně jako u výsledků odporové sítě i u metody konečných prvků je zjevné umístění zubů a drážek. V důležitých částech jako jsou zuby, se hodnoty odporové sítě přibližují hodnotám metody konečných prvků. Kvůli zjednodušení odporové sítě není možné simulovat například měnící se magnetickou indukci v jednotlivých částech určitého zubu, a proto nedokáže simulovat nižší nasycení ve střední části zubu, jak je patrné z metody konečných prvků. Největší nepřesnost je patrná ve 180° el, kde odporová síť nezvládne zobrazit měnící se polaritu v daném zubu. Další patrná nepřesnost se nachází v okrajových elementech. Menší nepřesnosti jsou viditelné i v drážkách. Nevýhodou odporové sítě je malý počet uzlů, což má za následek zanedbání spousty jevů, které by požadovaný výsledek zpřesnily a zároveň malý počet vypočtených magnetických indukcí. Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.3, výhodou této metody je rychlost výpočtu i s nižší přesností.

8.2 Porovnání vypočtené posuvné síly s katalogovým listem

Porovnání tahové síly není tak vypovídající jako grafické porovnání magnetické indukce ve vzduchové mezeře viz obrázek 8-1. Výpočet posuvné síly je zjednodušený a kvůli tomu při výpočtu vzniká malá nepřesnost. Porovnání je uskutečněno vypočtenou posuvnou silou z rovnice (7.7-8). Referenční hodnota, se kterou bude vypočtená hodnota porovnaná, je zmíněna v

Tabulka 3, kde jsou zobrazeny katalogové hodnoty.

Odchylka se vypočte jako:

$$\delta_r = \frac{F_{vyp} - F_{kat}}{F_{kat}} \cdot 100 = \frac{246 - 250}{250} \cdot 100 = -1,6\% \quad (8.2-1)$$

9 Závěr

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku lineárních motorů, jejich návrh a porovnání výsledků. Pro tuto práci byl firmou Baumüller vybrán lineární motor se železným jádrem. Přestože je metoda konečných prvků velmi přesná, je časově náročná a těžko je lze použít při iteračních optimalizacích návrhu motoru a počátečních konstrukčních postupech, kde se několik parametrů mění v širokém rozmezí. Z tohoto důvodu byla pro výpočet vybrána metoda odporových sítí.

Prvním úkolem bakalářské práce byla literární rešerše na téma lineárních motorů. Na začátku bakalářské práce je obecný popis lineárního motoru. Dále je vysvětlen jeho princip, shrnuty jeho výhody a nevýhody, rozdělení lineárních motorů podle vzniku posuvné síly a také příslušenství nezbytné pro správný provoz lineárního motoru. Jednou z největších výhod lineárních motorů je absence mechanického převodu pro vytvoření posuvného pohybu. Toho se využívá v aplikacích, kde je důležitá vysoká přesnost při polohování. Nevýhodou těchto motorů je však vyšší pořizovací cena oproti motorům rotačním. Následně se tato práce zabývala negativními jevy, které způsobují v motorech ztráty. Ztráty jsou nedílnou částí každého stroje. Avšak ne každý negativní efekt se objevuje u všech typů lineárních motorů, jako je například lineární motor bez železného jádra, u kterého se neobjeví ztráty v železe. Dále jsou popsány magnety, jejich rozdělení podle materiálu, ze kterého jsou tvořeny a faktory, které mohou magnety demagnetizovat. Pro tuto bakalářskou práci byly vybrány určité typy lineárních motorů, které byly podrobně popsány z konstrukčního hlediska. Dále byly popsány jejich výhody a nevýhody a v neposlední řadě jejich použití. Většina synchronních lineárních motorů s permanentními magnety využívá magnety ze vzácných zemin, avšak jsou i motory, které jsou schopné fungovat i s levnější náhradou ve formě ferritových magnetů.

Druhým úkolem bylo vytvoření modelu pro výpočet lineárního motoru vybranou metodou. Byla vybrána metoda odporových sítí. Tento postup byl vybrán ze dvou důvodů. Prvním důvodem je dosažení dobrých výsledků a druhým jeho jednoduché použití na elektrické motory. Model lineárního motoru se železným jádrem byl sestaven podle teoretických poznatků získaných ze článku [12], který se touto problematikou zabývá. Principem metody odporových sítí je rozdělení motoru na segmenty. Motor má tři základní části – primární část, sekundární část a vzduchovou mezeru. Hledaným výsledkem odporové sítě je velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Pro řešení modelu byla použita metoda smyčkových proudů. Byla sestavena soustava rovnic, které byly následně vloženy do programu Matlab. Nelineární prvky byly zohledněny a následně byla soustava vyřešena.

Třetím úkolem bylo zpracovat a zhodnotit výsledky. Výsledky získané z odporové sítě byly porovnány s výsledky získanými za pomoci metody konečných prvků vypočítanými programem Femag. Hodnoty magnetické indukce získané z obou zmíněných metod jsou zobrazeny v Obrázek 8-1, kde jsou hodnoty vyneseny v závislosti na elektrickém úhlu. Hodnoty vypočtené za pomoci odporové sítě se v důležitých bodech vzduchové mezery od metody konečných prvků příliš neliší. Velkou odchylku je možné sledovat v místě, kde se mění polarita magnetické indukce. Další znatelná odchylka je v místech okrajových elementů. Tyto odchylky jsou pravděpodobně způsobeny malým počtem měřených bodů odporové sítě ve vzduchové

mezeře. Je možné zmenšit odchylku přidáním více bodů, ale tím by se stal řešený obvod náročnější na vytvoření i výpočet. Další porovnání výsledků bylo uskutečněno za pomoci porovnání posuvné síly s katalogovou hodnotou. Avšak toto porovnání není zcela názorné kvůli zjednodušenému výpočtu posuvné síly. Odchylka vyšla 1,6 % a postup výpočtu je znázorněn v kapitole 8.2.

Nevýhodou vytvořeného modelu pomocí smyčkových proudů je časová náročnost při skládání rovnic, následné kontrole, odladění i složení soustavy rovnic. Tvorba odporové sítě není uživatelsky přívětivá a je velmi náročné v ní odhalit chybu. Avšak model, který je funkční a odladěný, je možné jednoduše aplikovat tento model pro spoustu motorů, které se nemění typem, ale rozměry. Funkčnost vytvořeného modelu odporové sítě bude otestována na několika dalších motorech stejného typu. Při dosažení uspokojivých výsledků by tato odporová síť mohla nahradit metodu konečných prvků při prvotním návrhu. Avšak je důležité návrh překontrolovat i metodou konečných prvků, aby se potvrdila správnost výsledků. Změna vstupních atributů není nijak náročná. Velkou výhodou je, že není potřebný žádný speciálně vytvořený software pro elektrické obvody, protože soustava rovnic je řešena matematicky. Není nutné žádné grafické rozhraní. To umožňuje využití například open-source programů jako je GNU Octave. Díky využití open-source programů je možné ušetřit náklady za licenci, protože řada těchto programů je dostupná zdarma. Další možností je přepsání kódu do programovacího jazyku Python, pro snazší integraci do dalších aplikací.

Zdroje

- [1] Lineární motory. In: <http://www.moogbrno.cz> [online]. b.r. [cit. 2018-09-29]. Dostupné z: http://www.moogbrno.cz/mt-content/uploads/2017/09/cz_lin-obecne_020909.pdf
- [2] ROMAN, Jan. *Řízení lineární pohonů HIWIN* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2018-09-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33337>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Pavel Houška.
- [3] BARRETT, Jack, Tim HARNED a Jim MONNICH. *Linear motor basics* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <http://www.parkermotion.com/whitepages/linearmotorarticle.pdf>
- [4] VŠB-TU Ostrava, FEI. *Pohony s lineárními motory* [online]. [cit. 2014-8-22]. Dostupný na www: <http://www.fei1.vsb.cz/kat430/data/erp2/ERP%20-%20Pohony%20s%20lineárními%20motory.pdf>
- [5] KNOBLOCH J. Koncepce pracoviště pro měření lineárních motorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2009. 63 s. Diplomová práce. Vedoucí práce byl Bohumil Klíma.
- [6] Trilogy Linear Motor & Linear Motor Positioners. In: *Parker Hannifin Corporation* [online]. 2007 [cit. 2018-10-08]. Dostupné z: http://www.parkermotion.com/pdfs/Trilogy_Catalog.pdf
- [7] Dimensioning of linear motors. In: *Beckhoff* [online]. 2016 [cit. 2017-10-08]. Dostupné z: https://download.beckhoff.com/download/document/motion/al2000_dimensioning_en.pdf
- [8] ŠERÝ, M. Vlastnosti permanentních magnetů. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2013. 50 s. Vedoucí diplomové práce ing. Karel Hruška Ph.D.
- [9] SCHNABL, J. Měření ztrát feromagnetických materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 71 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.
- [10] BLAHOVEC, A. *Elektrotechnika I*. 5. vyd. Praha: Informatorium, 2005. ISBN 80-85427-72-9.
- [11] CHEVAILLER, Samuel a Marcel JUFER. *Comparative study and selection criteria of linear motors*. Lausanne: EPFL (Lausanne), 2006. DOI: 10.5075/epfl-thesis-3569.
- [12] B. Sheikh-Ghalavand, S. Vaez-Zadeh and A. H. Isfahani, "An Improved Magnetic Equivalent Circuit Model for Iron-Core Linear Permanent-Magnet Synchronous Motors," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 1, pp. 112-120, Jan. 2010.

- [13] D. Momma, Y. Yoshida and K. Tajima, "Demagnetization analysis of ferrite magnet motor based on reluctance network analysis," *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Chiba, 2016, pp. 1-4.
- [14] V. Boscaino *et al.*, "The effect of manufacturing tolerances on a tubular linear ferrite motor," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, 2015, pp. 005174-005177.
- [15] SPORNI, Peter. Model synchronního stroje s PM založeného na ekvivalentní reluktanční síti. 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [16] J. F. Gieras, E. Santini and M. Wing, "Calculation of synchronous reactances of small permanent-magnet alternating-current motors: comparison of analytical approach and finite element method with measurements," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 3712-3720, Sept. 1998, doi: 10.1109/20.718533.
- [17] S. Najafi and N. C. Kar, "Impact of Saturation on Transient Behavior of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors," *2006 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Ottawa, Ont., 2006, pp. 807-810, doi: 10.1109/CCECE.2006.277735.
- [18] A. Boduroglu, M. Gulec, Y. Demir, E. Yolacan and M. Aydin, "A New Asymmetric Planar V-Shaped Magnet Arrangement for A Linear PM Synchronous Motor," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 7, pp. 1-5, July 2019, Art no. 8105905, doi: 10.1109/TMAG.2019.2897820.
- [19] V. Di Dio, G. Cipriani, M. Corpora, D. Curto and M. Trapanese, "A Ferrite Tubular Linear Motor (FTLM): Analysis and design," *2015 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)*, Beijing, 2015, pp. 1-1, doi: 10.1109/INTMAG.2015.7157307.
- [20] D. Collins, Tubular linear motors for gantry applications [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/tubular-linear-motors-for-gantry-applications/>
- [21] Linear motor systems: Iron core, U-channel and tubular linear motors. In: Nippon pulse America, Inc.[online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.nipponpulse.com/learning/white-papers/linear-motor-systems-iron-core-u-channel-and>
- [22] Eddy current. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001. [cit. 2020-05-10]. dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current

- [23] SEDLÁK, Bedřich; ŠTOLL, Ivan. *Elektřina a magnetismus*. [s.l.]: [s.n.] 650 s. ISBN 80-200-1004-1.
- [24] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek IV: Magnetické obvody ve výkonové elektronice, pulzní měniče s transformátorem*. Brno, 2008. Skriptum. VUT
- [25] JINDRA, Tomáš. *Optimalizace stroje s permanentními magnety v rotoru tangenciální polarizace pomocí umělé inteligence*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce. Vedoucí práce Jiří Kurfürst.
- [26] VOJÁČEK, Antonín. *Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu* [online]. 2017 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/rotacni-ekodery-pro-řízení-pohonu-a-pohybu.html>
- [27] ROMAN, Jan. *Řízení lineárních pohonů HIWIN* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33337>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Pavel Houška
- [28] LSE Series Documentation. In: Baumueller s.r.o [online], [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.baumueller.com/cs/produkty/motory/linearni-motory>
- [29] Tubular linear motors for gantry applications. In: Linear motion tips [online], [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/tubular-linear-motors-for-gantry-applications/>
- [30] BOLDEA, Ion. *Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook*. USA, Florida, Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 9781439845141.
- [31] Daryl L. Logan (2011). *A first course in the finite element method*. Cengage Learning. ISBN 978-0495668251
- [32] Two Reaction Theory-Salient Pole Synchronous Machine. In: Circuit globe [online], [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://circuitglobe.com/two-reaction-theory-salient-pole-synchronous-machine.html>

Seznam symbolů, veličin a zkratk

\vec{F}	-	Lorentzova síla [N]
\vec{v}	-	Vektor rychlosti částice [ms^{-1}]
\vec{B}	-	Vektor magnetické indukce [T]
δ_r	-	Relativní odchylka výpočtu [-]
F_{vyp}	-	Vypočtená posuvná síla [N]
F_{kat}	-	Katalogová hodnota posuvné síly [N]
F_N	-	Nominální hodnota posuvné síly [N]
F	-	Posuvná síla [N]
I_{celk}	-	Celkový proud tekoucí vodiči [A]
I	-	Elektrický proud [A]
l	-	Dráha [m]
q	-	Náboj částice [C]
t	-	Čas [s]
B	-	Magnetická indukce [T]
v	-	Rychlost [ms^{-1}]
l_{fe}	-	Aktivní délka železa [m]
B_{max}	-	Maximální magnetická indukce [T]
N_{dr}	-	Počet závitů ve drážce [-]
Q_{dr}	-	Počet drážek [-]
$Q_{dr-aktiv}$	-	Počet aktivních drážek [-]
S	-	Plocha [m^2]
Φ	-	Magnetický tok [Wb]
α_i	-	Činitel vzájemné polohy [-]
$w_{t,s}$	-	Šířka zubu nebo drážky [m]
$w_{t,s-nad PM}$	-	Šířka zubu nebo drážky nad permanentním magnetem [m]
U_m	-	Magnetické napětí [A]
R_m	-	Magnetický odpor [H^{-1}]
S_{PM}	-	Plocha permanentního magnetu [m^2]

B_r	-	Remanentní magnetická indukce [T]
F_m	-	Magnetomotorické napětí [A]
F_{mPM}	-	Magnetomotorické napětí permanentního magnetu [A]
I_k	-	Proud procházející vodičem [A]
w_s	-	Šířka mezery [m]
w_t	-	Šířka zubu [m]
h_y	-	Výška jha [m]
h_t	-	Výška zubu primárního dílu [m]
h_s	-	Výška drážky [m]
w_m	-	Šířka magnetu [m]
h_m	-	Výška magnetu [m]
w_f	-	Velikost mezery mezi magnety [m]
L	-	Délka motorového svazku [m]
g	-	Velikost vzduchové mezery [m]
τ_s	-	Pólová rozteč [m]
μ_0	-	Permeabilita vakua [Hm ⁻¹]
μ_r	-	Relativní permeabilita [-]
B_t	-	Magnetická indukce v zubu [T]
W_h	-	Hysterezní ztráty [J]
$W_{h1,2}$	-	Energie dodaná [J]
$W_{h2,1}$	-	Energie odevzdaná [J]
\vec{H}	-	Vektor intenzity magnetického pole [Am ⁻¹]
$U_{m,n}$	-	Magnetické napětí n-tého zubu [A]
i_n	-	Proud n-té fáze [A]
R_y	-	Magnetický odpor elementu jha [H ⁻¹]
R_t	-	Magnetický odpor zubu primárního dílu [H ⁻¹]
R_z	-	Magnetický odpor elementu vzduchové mezery mezi zuby [H ⁻¹]
R_{gz}	-	Magnetický odpor rozptylové ztráty [H ⁻¹]
R_{gs}	-	Magnetický odpor vzduchové mezery pod drážkou [H ⁻¹]

R_{gt}	-	Magnetický odpor vzduchové mezery pod drážkou [H^{-1}]
R_{mgi}	-	Magnetický odpor vzduchové mezery v závislosti na vzájemné poloze i-tého zubu a permanentního magnetu [H^{-1}]
R_{mm}	-	Rozptylová reluktance [H^{-1}]
U_{m-pm}	-	Magnetické napětí permanentního magnetu [A]
i_m	-	Amplituda proudu [A]
Φ_0	-	Fázový posun [rad]
x	-	Pozice primární části [m]
N_c	-	Celkový počet závitů [-]